

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



JELENA BAJKOVEC

RADON U KUĆAMA U MEĐIMURSKOJ ŽUPANIJI

Diplomski rad

Osijek, 2015.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



JELENA BAJKOVEC

RADON U KUĆAMA U MEĐIMURSKOJ ŽUPANIJI

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

radi stjecanja akademskog naziva MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE

Osijek, 2015.

Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom Igora Miklavčića, prof. i mentorstvom izv. prof. dr. sc. Vanje Radolića u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku.

Predgovor

Zahvaljujem se izv. prof. dr. sc. Vanji Radoliću za mentorstvo i pomoć pri izradi diplomskog rada te Igoru Miklavčiću, prof. za pomoć pri analizi rezultata.

Sadržaj

| | | |
|----------|--|----|
| 1. | Uvod | 1 |
| 2. | Radioaktivnost | 2 |
| 2.1. | Tipovi radioaktivnosti | 4 |
| 2.1.1. | α -raspad..... | 5 |
| 2.1.2. | β -raspad..... | 6 |
| 2.1.2.1. | β -plus raspad..... | 6 |
| 2.1.2.2. | β -minus raspad..... | 7 |
| 2.1.2.3. | Uхват elektrona..... | 7 |
| 2.1.3. | γ -raspad..... | 8 |
| 2.2. | Zakon radioaktivnog raspada..... | 9 |
| 2.3. | Zračenje | 10 |
| 2.4. | Radioaktivni raspad na Zemlji..... | 11 |
| 3. | Radon | 12 |
| 3.1. | Fizikalno – kemijske karakteristike radona | 12 |
| 3.2. | Izvori radona..... | 14 |
| 3.3. | Koncentracije radona u kućama | 16 |
| 3.4. | Načini ulaska radona u kuću | 17 |
| 3.5. | Opasnost radona za zdravlje | 18 |
| 4. | Dozimetrija | 20 |
| 4.1. | Dozimetrijske veličine i mjerne jedinice | 20 |
| 4.2. | Dozimetrijski model za radon..... | 23 |
| 5. | Eksperimentalni dio | 25 |
| 5.1. | Međimurska županija | 25 |
| 5.2. | Mjerenje koncentracije radona u kućama u Međimurskoj županiji..... | 25 |
| 5.3. | Izrada detektora | 26 |
| 5.4. | Postavljanje i prikupljanje detektora | 28 |
| 5.5. | Jetkanje filmova | 29 |
| 5.6. | Brojanje tragova i statistička obrada..... | 31 |
| 5.6.1. | Matematički izrazi za računanje | 33 |
| 6. | Rezultati i rasprava | 36 |
| 7. | Zaključak | 47 |

| | | |
|----|-------------------------|----|
| 8. | Literatura | 48 |
| 9. | Životopis | 49 |

RADON U KUĆAMA U MEĐIMURSKOJ ŽUPANIJI

JELENA BAJKOVEC

Sažetak

U teorijskom dijelu diplomskog rada opisani su tipovi radioaktivnosti, zakon radioaktivnog raspada, a navedene su i vrste i izvori zračenja. Zatim su definirane osnovne dozimetrijske veličine i njihove mjerne jedinice. Prikazane su fizikalno-kemijske karakteristike radona i njegovih kratkoživićih potomaka. Opisan je način na koji radon ulazi u kuće te postupci prevencije njegova ulaska kao i postupci smanjenja povišene koncentracije radona u kućama. Objašnjen je štetan utjecaj radona na zdravlje čovjeka kao razlog zbog kojeg se i vrši istraživanje koncentracije radona u kućama.

U eksperimentalnom dijelu rada objašnjena je metoda mjerenja radona pomoću detektora nuklearnih tragova. Detaljno je opisan način izrade, postavljanja i prikupljanja detektora, kao i sama obrada rezultata mjerenja. Dobiveni podaci predstavljeni su tablično i grafički izradom dva zemljovida radonske koncentracije: po administrativnim jedinicama (Međimurska županija) te mrežnim pristupom. Izmjerene koncentracije radona u kućama su bile u intervalu od 11 do 528 Bq m⁻³, a srednji ravnotežni faktor iznosi 0,55. Srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent za radon i njegove kratkoživiće potomke, prema korištenom ICRP 65 modelu, za stanovnike Međimurske županije iznosi 2,09 mSv.

49 stranica, 19 slika, 9 tablica, 13 literarnih navoda

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: detektori nuklearnih tragova / Međimurska županija / radon u zraku / radioaktivnost

Mentor: izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić

Ocjenjivači: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

Igor Miklavčić, prof.

doc.dr.sc. Denis Stanić

Rad prihvaćen: 23. prosinca 2015. odlukom Odbora za diplomske i završne radove

RADON IN HOUSES IN MEDIMURJE COUNTY

JELENA BAJKOVEC

Abstract

In the theoretical part of this bachelor thesis, the types of radioactivity, law of radioactivity as well as the meaning of radioactivity in general are described. The basic dosimetric quantities and its units are defined. After that, the physical and chemical properties of radon and its short-lived progeny are introduced. The sources of radon are specified and the mechanisms of entering the houses as well as the importance of protecting and decreasing radon levels in houses are emphasized. The impact of radon issue on public health and related experimental research are commented.

The method of radon measurement by nuclear track etched detectors is described in experimental part of this thesis. The way of producing, setting up and collecting of detectors as well as the way of their analysis is briefly described. The obtained data are presented in tabular and graphical ways. Two indoor radon maps are produced: one using administrative borders of Međimurje county and the other using grid cell approach. Indoor radon concentrations were in range from 11 to 528 Bq m⁻³. The averaged equilibrium factor was 0.55. The population of the Međimurje county receive the annual effective dose equivalent due to radon and its short-lived progeny of 2.09 mSv in average.

49 pages, 19 figures, 9 tables, 13 references

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: Medimurje county / track etched detectors / radon in the air / radioactivity

Supervisor: Vanja Radolić, PhD.

Reviewers: Marina Poje Sovilj, PhD, Assistant Professor

Igor Miklavčić, Lecturer

Denis Stanić, PhD, Assistant Professor

Thesis accepted: 23rd December 2015. by decision of the Committee for Bachelor of Science Thesis and Final Thesis

1. Uvod

Ljudi su svakodnevno izloženi prirodnoj radioaktivnosti koja se nalazi u zemlji, vodi, zraku i hrani te su takva zračenja normalna i sastavni su dio naše okoline u kojoj živimo. Radijacijska doza primljena od radona i njegovih neposrednih kratkoživićih potomaka u radioaktivnom nizu odgovorna je za polovinu ukupne doze koju čovjek primi iz prirodnih izvora u godinu dana.

Prva mjerenja radona u kućama započela su u drugoj polovici 20. stoljeća u Švedskoj te su na mnogim lokacijama uočena značajna odstupanja od prosječnih vrijednosti. Visoke koncentracije potjecale su od građevinskih materijala od kojih su kuće bile izgrađene jer su sadržavali visoku koncentraciju radija.

Radon je plin bez boje i mirisa, radioaktivan je, radiotoksičan i kancerogen ako se udiše. Radon je potomak uranija, prirodnog minerala u stijenama i zemlji. Većina radona koji ulazi u građevine dolazi direktno iz zemlje, u neposrednom dodiru s građevinom ispod podruma ili temelja. Radon se također nalazi i u vodi pa tako sa svakom uporabom vode u kućanstvu ulazi u naše domove pa tako i u naš organizam. Radon ne možemo uočiti ljudskim osjetilima i spriječiti da ga ne udahnemo, a on i njegovi kratkoživići potomci mogu biti jako opasni za ljudsko zdravlje. Naime, znanstveno je dokazano da je radon drugi uzročnik karcinoma pluća odmah nakon konzumiranja duhanskih proizvoda [James, 1988]. U slučaju povećane koncentracije radona u prostoriji u kojoj boravimo, povećava se i rizik od obolijevanja. Njegova koncentracija se može smanjiti redovitim prozračivanjem prostorija.

U Hrvatskoj se provode odgovarajuća istraživanja vezana uz utjecaj radona na život čovjeka. Izrađen je preliminarni radonski zemljovid Republike Hrvatske koji pokazuje da u nekim dijelovima zemlje postoji realna opasnost od povišene koncentracije radona u kućama [Radolić et al, 2006]. Cilj ovog diplomskog rada je bio eksperimentalno provjeriti koncentracije radona u kućama u Međimurskoj županiji.

2. Radioaktivnost

Radioaktivnost ili radioaktivni raspad je svojstvo nekih vrsta atoma da im se jezgre spontano mijenjaju i pri tome emitiraju energiju zračenjem.

Radioaktivno zračenje mijenja strukturu i svojstva materijala kroz koje prolazi. Pri tome je najznačajniji efekt ionizacija, odnosno izbijanje elektrona iz elektronskog omotača nekog atoma. Atomi i molekule se normalno nalaze u neutralnom stanju, tj. broj pozitivnih protona u jezgri jednak je broju negativnih elektrona u ljusci. Ako atom, uslijed sudara s drugom česticom (npr. fotonom, drugim elektronom), izgubi elektron, novonastali atom se naziva ion i njegova svojstva se uvelike razlikuju od originalnog atoma. Ionizirajuće zračenje se može sastojati od snopa čestica visokih energija (elektrona, protona ili α -čestica) ili elektromagnetskog zračenja visoke frekvencije, koje može imati poguban učinak na molekule tvari, a posebno na biološka tkiva.

Rendgensko zračenje, posebno njegova primjena u medicini, danas je dobro poznata široj javnosti, ali prije stotinjak godina njegovo postojanje nije bilo poznato. To se promijenilo slučajnim otkrićem Wilhelma Conrada Röntgena, nakon toga je objašnjena priroda tog fenomena i otkrivena je radioaktivnost.

Tijekom 1895. Röntgen je ispitivao učinke katodnih zraka izvan vakuumskih cijevi. U pripremi jednog od takvih eksperimenata testirao je aparaturu u mraku i zamijetio nekakvo svjetlucanje kristalića na stolu, koji su bili udaljeni metar od eksperimentalne aparature, kad god bi uključio visoki napon. Pošto se u ponovljenim pokušajima događalo isto, upalio je šibicu i shvatio da svjetlucanje dolazi od kristala koji je tu bio odložen čekajući neki od sljedećih eksperimenata. Kristaliće je pokušao zastrijeti knjigom, krpom, metalom, ali oni su i dalje svjetlucali. Nakon nekoliko tjedana rada u tajnosti, objavljuje knjigu „O jednoj vrsti zraka“. U radu je istaknuo razliku koju je uočio između ponašanja katodnih zraka i zraka koje je nazvao X-zrakama. Novootkrivene zrake nije uspio otkloniti magnetom pa je pretpostavio njihovu sličnost sa zrakama svjetlosti. Svijet saznaje za postojanje rentgenskih ili X-zraka. Röntgen je umro 1923. od raka. Vjeruje se da rak nije bio posljedica njegovog rada s ionizirajućim zračenjem, jer je u tim istraživanjima proveo samo kratko vrijeme, a bio je jedan od rijetkih pionira istraživanja radioaktivnosti koji je redovito koristio olovnu zaštitu.

Henry Becquerel se 1896. godine bavio proučavanjem svjetlucanja prirodno fluorescentnih elemenata. Izlagao je uranijeve soli Suncu, te ih umatao u tamni papir i stavljao na fotografske ploče, uvjeren da uranij upija energiju od Sunca te ju emitira u obliku rendgenskih zraka. Ova je

hipoteza opovrgnuta kad zbog oblačnog vremena nije uspio izložiti soli sunčevim zrakama. Iz nekog je razloga ipak razvio fotografske ploče i ostao začuđen jednako čistim slikama, dokazujući da uranij emitira zrake bez pomoći vanjskog izvora energije poput Sunca. Daljnjim pokusima dokazuje da nije riječ o rendgenskom zračenju. Prema njemu je nazvana mjerna jedinica za radioaktivnost, bekerel (Bq).

Marie Skłodowska Curie je zajedno sa suprugom Pierrom Curiem istraživala prirodu Becquerelovih zraka, koje emitiraju svi spojevi koji sadrže element uranij. Otkrila je i jedan dotad nepoznat element koji je u počast svoje domovine nazvala polonij. I taj, kao i sve druge elemente koji zrače Becquerelove zrake, nazvala je radioaktivnim elementima, a njihovo svojstvo radioaktivnost.

Marie Curie, Pierre Curie i Henry Becquerel podijelili su Nobelovu nagradu za fiziku, 1903. godine. Obrazloženje Švedske akademije znanosti bilo je: „kao priznanje za izuzetne zasluge koje su iskazali zajedničkim istraživanjem fenomena radioaktivnog zračenja, kojeg je otkrio profesor Henry Becquerel.“

Ernest Rutherford je 1898. godine ustanovio da se zračenje iz uranija sastoji od dviju komponenti. Jedna koja se lako apsorbira u tvarima (nazvao ju je α -zračenje) i druga koja je prodornija (β -zračenje). Otkrio je postojanje atomske jezgre (pokus raspršenja α -čestica na tankoj foliji zlata) i postavio model atoma sličan solarnom sistemu u kojem elektroni kruže oko atomske jezgre jednako kao što planeti kruže oko Sunca. Rutherford je u povijesti zabilježen kao prvi „pravi“ alkemičar, jer je izvodeći nuklearnu reakciju (1919. god.), pretvorio dušik u kisik.

2.1. Tipovi radioaktivnosti

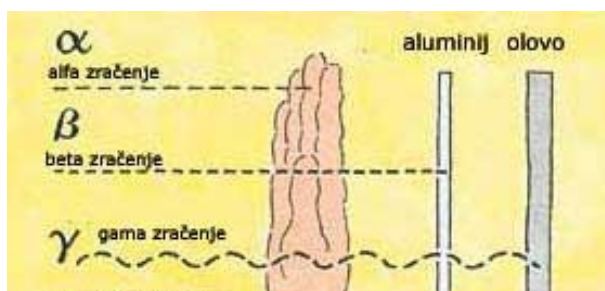
Prva istraživanja su pokazala da iz radioaktivnih tvari (npr. uranijevih spojeva) izlazi prodorno zračenje koje zacrnjuje fotografsku ploču čak i kada je umotana u crni papir. Kada je zračenje propušteno kroz magnetsko polje, tako da je snop zračenja okomit na polje, jedan njegov dio otklanja se na jednu stranu, drugi na drugu, a treći je prolazio neotklonjen. Te tri vrste zračenja označene su grčkim slovima i nazvane α -zrake, β -zrake i γ -zrake.

Danas znamo da su α -čestice pozitivne jezgre atoma helija (${}^4_2\text{He}$), β -čestice su negatroni ili pozitroni dok su γ -čestice elektromagnetski valovi kratkih valnih duljina i velikih energija.

Alfa-čestice su, u odnosu na druge tipove zračenja, velikih dimenzija i nose dvostruki pozitivan naboj te nemaju veliku prodornost, može ih se zaustaviti slojem papira. U ljudskom tkivu putuju vrlo kratko, no zbog svoje velike energije na tom kratkom dijelu puta čine velika oštećenja. Elementi koji ih emitiraju nisu opasni dok na nas djeluju izvana kratkotrajno, ali vrlo su štetni ako ih unesemo u organizam.

Beta-čestice su iznimno malene u usporedbi s α -česticama i nose jednostruki negativni naboj. Prodornost im je veća nego prodornost α -čestica, ali mogu biti zaustavljene već tankim slojem aluminija. U ljudskom tkivu prodiru dublje, ali izazivaju mnogo manja oštećenja.

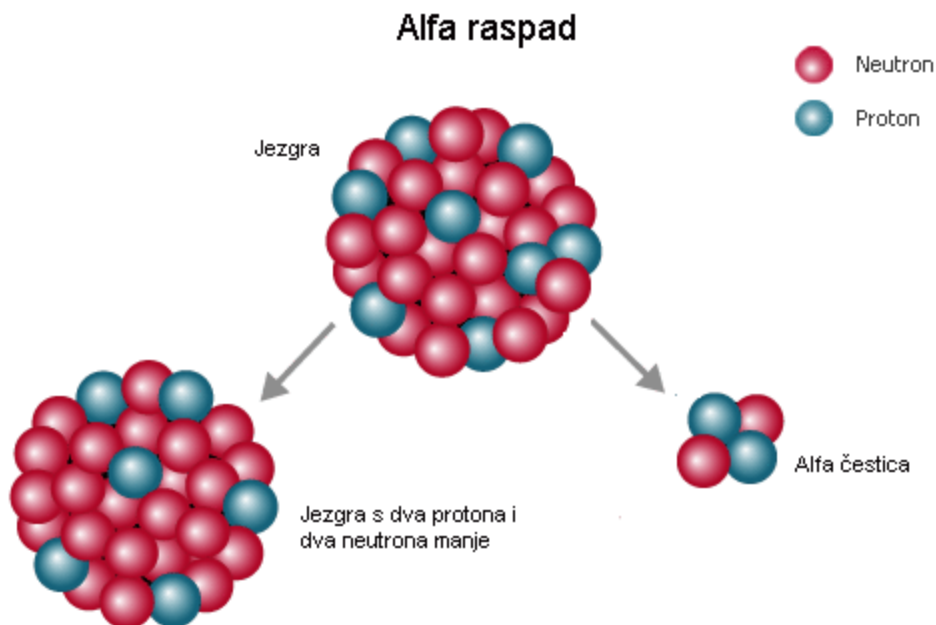
Gama-čestice nemaju ni masu ni električni naboj, mogu putovati iznimno duboko u ljudsko tijelo (u odnosu na α - i β -čestice), svojim putem čine manju štetu, no u stanju su izazvati oštećenja unutarnjih organa.



Slika 1. Prodornost α , β i γ zračenja

2.1.1. α -raspad

α -raspad ili α -radioaktivnost je proces u kojem radioaktivne jezgre spontano emitiraju α -česticu, koja sadrži dva protona i dva neutrona u obliku jezgre ${}^4_2\text{He}$.



Slika 2. α -raspad

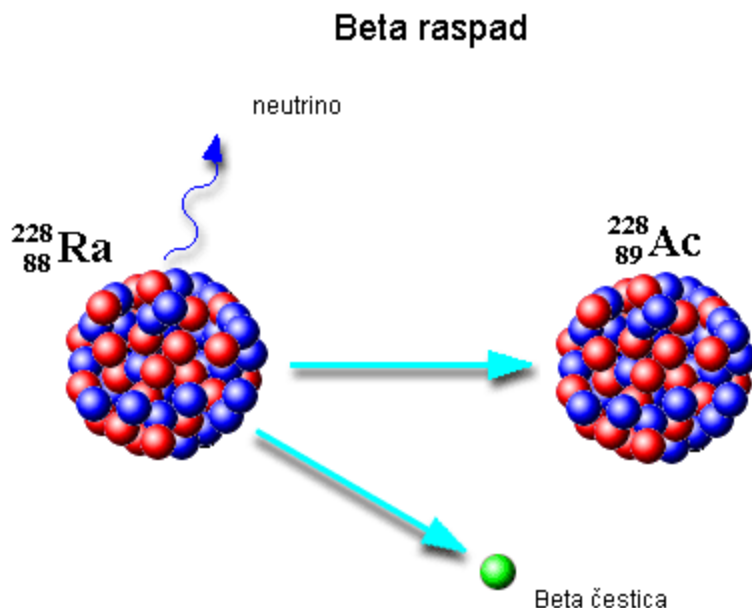
Pri α -raspadu početna se jezgra sa Z protona i N neutrona pretvara u drugu jezgru, s dva protona i dva neutrona manje, tj. sa $Z-2$ protona i $N-2$ neutrona.



α -raspad se događa samo kod vrlo teških elemenata kao što su uranij, torij i radij. Jezgra tih atoma je vrlo „bogata neutronima“ (ima puno više neutrona nego protona u jezgri), što omogućava emisiju α -čestice. α -čestice su vrlo teške i vrlo visokih energija u usporedbi s ostalim čestim tipovima zračenja. Ta svojstva omogućuju α -česticama da spremno međudjeluju s materijalima na koje naiđu, te tako uzrokuju puno ionizacija na vrlo malim udaljenostima. α -čestica neće putovati više od nekoliko centimetara u zraku i može se lako zaustaviti listom papira, kratkoročno zračenje izvana nije opasno po čovjeka jer je koža dovoljna da ga zaustavi, ali ako osoba u sebe unese izvor α -čestica one mogu razorno djelovati na unutarnje organe zbog svoje velike energije.

2.1.2. β -raspad

β -raspad ili β -radioaktivnost je proces u kojem radioaktivna jezgra spontano mijenja svoju građu tako da se jedan neutron u njima pretvori u proton ili jedan proton u neutron.



Slika 3. β -raspad

Razlikujemo tri tipa beta-raspada:

- β -minus raspad
- β -plus raspad
- elektronski uhvat

2.1.2.1. β -plus raspad

Pri β -plus raspadu jedan proton u jezgri pretvara se u neutron, a iz jezgre izlijeću dvije čestice, antielektron i neutrino. Antielektron, koji nastaje pri ovom raspadu, ima jednaku masu kao i elektron, ali mu je električni naboj suprotan, tj. jednak je naboju protona. Za antielektron koristi se i naziv pozitron. Neutrino je čestica bez naboja i mase, uopće ne djeluje ili jako teško na bilo koju tvar kroz koju prolazi pa praktički nema nikakva učinka.

Pri β -plus raspadu broj protona u jezgri smanji se za jedan, a broj neutrona poveća se za jedan, te se maseni broj jezgre ne mijenja.

$$p^+ \rightarrow n + \beta^+ + \nu \quad (2)$$

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \beta^+ \quad (3)$$

2.1.2.2. β -minus raspad

β -minus raspad je raspad jezgre u kojem se neutron u jezgri pretvara u proton, a iz jezgre izlijeću dvije čestice negatron (čestica mase i naboja jednaka elektronu) i antineutrino. Antineutrino je čestica bez električnog naboja i masa mu je praktično nula. Gotovo uopće ne djeluje na tvar kroz koju prolazi pa nema gotovo nikakvog učinka.

Broj protona u jezgri povećava se za jedan, a broj neutrona smanjuje se za jedan, pa se maseni broj jezgre mijenja.

$$n \rightarrow p + \beta^- + \nu \quad (4)$$

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + \beta^- \quad (5)$$

2.1.2.3. Uхват elektrona

Uхват elektrona konkurentan je proces β -plus raspadu. U ovom raspadu jedan od elektrona iz omotača (K-ljuska najbliža jezgri) biva povučen od protona u jezgri. Proton prelazi u neutron uz emitiranje neutrina (točno definiranje energije).

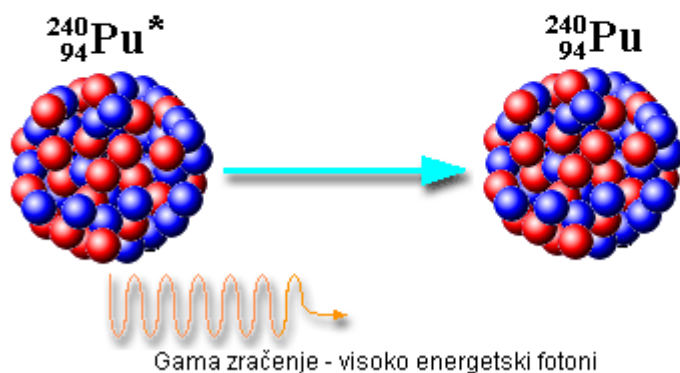
$$p^+ + e^- \rightarrow n + \nu \quad (6)$$

$${}_Z^AX + e^- \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \nu \quad (7)$$

2.1.3. γ -raspad

Elektromagnetsko zračenje koje emitiraju atomske jezgre zovemo γ -zračenje, a fotone tog raspada γ -fotoni. Proces pri kojemu atomske jezgre emitiraju γ -zračenje zovemo radioaktivnim γ -raspadom, a svaku atomsku jezgru koja emitira γ -zračenje zovemo gama radioaktivnom.

Gama raspad



Slika 4. γ -raspad

Jezgra emitira kvant elektromagnetskog zračenja, energije jednake razlici između konačnog i početnog energetskeg stanja jezgre. Simbolički γ raspad zapisujemo:



Poluživoti γ raspada često su vrlo kratki, reda 10^{-9} s i kraći, no postoje i γ raspad koji imaju znatno duži poluživot - nekoliko sati ili dana. Ova dugoživa stanja nazivamo još izomerna ili metastabilna stanja, a označavamo ih ${}^AX^m$ ili ${}^{Am}X$.

Energije γ -fotona iz atomskih jezgara milijun su puta veće od energija fotona koje emitiraju atomi. Zbog svoje velike energije fotoni γ -zračenja vrlo su prodorni i oštećuju elektronske omotače atoma i molekula na koje nalijeću. Zbog toga djeluju razorno i na tkiva živih bića. U γ -raspadu ne mijenja se maseni ni redni broj jezgre.

2.2. Zakon radioaktivnog raspada

Eksperimenti pokazuju da je broj radioaktivnih jezgri koje se raspadnu u nekom vremenu proporcionalan početnom broju jezgri i različit je za svaku vrstu radionuklida, uz uvjet da ne dodajemo nove jezgre u uzorak, što možemo zapisati kao:

$$-\frac{dN}{dt} = N\lambda \quad (9)$$

gdje je član s lijeve strane brzina raspada jezgri (minus nam govori da se broj jezgri smanjuje), a λ je konstanta koju nazivamo konstanta raspada i različita je za svaki radioaktivni nuklid dok je N početni broj jezgri. Rješavanjem gornje diferencijalne jednačbe lako dobijemo zakon radioaktivnog raspada:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (10)$$

gdje je N_0 konstanta integracije tj. broj jezgri u trenutku $t = 0$. Korisno nam je definirati vrijeme poluraspada $t_{1/2}$ koji nam kaže koliko je vremena potrebno da se raspadne pola od početnog broja jezgri. Uvrstimo li $N = N_0 / 2$ u jednačbu (10) za vrijeme poluraspada dobijemo:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (11)$$

$$e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \quad (12)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (13)$$

Aktivnost A definiramo kao mjeru pojave raspada u uzorku:

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (14)$$

Gdje je A_0 početna aktivnost u trenutku $t = 0$, tj. $A_0 = \lambda N_0$. Važno je zapamtiti da mjereći broj raspada ΔN u vremenu Δt nam predstavlja aktivnost uzorka samo kada je $\Delta t \ll \lambda^{-1}$. Aktivnost izražava broj raspada u nekom vremenskom intervalu, a mjerna jedinica SI sustava za aktivnost je

bekerele (Bq) i predstavlja jedan raspad u sekundi. Mjerna jedinica koja se još koristi je *kiri* (Ci) koji je isprva bio definiran kao aktivnost 1 grama radija, a sada je definiran kao:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}.$$

Treba istaknuti da zakon radioaktivnog raspada (10) ništa ne govori o pojedinačnoj jezgri koja se raspada već kako se smanjuje ukupna populacija jezgara. Zakon je statističke prirode te je nemoguće predvidjeti kada će se točno određena jezgra raspasti.

2.3. Zračenje

Zračenje je pojam kojim se označava prijenos energije ili čestica prostorom ili kroz tvari u obliku elektromagnetskih valova ili subatomske čestice. Ionizacija je proces kojim atomi gube, katkad i dobivaju, elektrone i tako od neutralnih postaju električki nabijene čestice, koje zovemo ioni.

Zračenje postoji svuda u okolišu. Najstarije radioaktivne tvari potječu još od prije postanka Zemlje zbog svog dugog vremena poluraspada – što zapravo dokazuje da je određena količina zračenja oduvijek postojala na Zemlji. U posljednjih sto godina zračenje u okolišu malo je povišeno zbog ljudskog utjecaja: testovi s atomskim oružjem i proizvodnja nuklearne energije. Intenzitet zračenja u okolišu ovisi o brojnim čimbenicima, o području gdje živimo, sastavu tla, geografskoj širini, građevinskim materijalima, godišnjem dobu, a djelomično i o vremenskim uvjetima. Kiša, snijeg, visoki ili niski atmosferski tlak i smjer vjetrova utječu na razinu zračenja u okolišu.

Ionizirajuće zračenje u prirodi, medicini, industriji i drugim istraživanjima, školstvu i katkad u javnoj uporabi rendgenske su zrake, gama zrake, elektroni i subatomske čestice.

Vanjsko zračenje ljudi, odnosi se na izlaganje zračenja od izvora koji su izvan tijela, npr. od rendgenskog uređaja ili nekog drugog uređaja koji proizvodi ionizirajuće zračenje, odnosno od beta, gama ili karakterističnih X-zraka koje emitiraju jezgre radioaktivnih atoma – radionuklidi.

Unutarnje zračenje ljudi nastaje kad radionuklid uđe u tijelo prehranom, udisanjem, kroz ozljede ili izravnom apsorpcijom kroz kožu.

2.4. Radioaktivni raspad na Zemlji

Jezgru koja se radioaktivno raspadne nazivamo jezgra roditelj, a jezgre koje nastaju raspadom jezgara roditelja nazivamo potomcima ili kćerima. Ako se potomci također radioaktivno raspadaju, tvore se nizovi elemenata koji se redom jedan za drugim raspadaju.

Radioaktivni raspad na Zemlji opažamo u četiri glavna raspadna niza. Oni započinju s vrlo teškim elementima koji gotovo i nemaju stabilne izotope, a raspadaju se α i β raspadom. Kako α raspad smanjuje maseni broj jezgre za četiri, imamo četiri različita niza s masenim brojevima $4n$, $4n + 1$, $4n + 2$ i $4n + 3$. U tablici 1. možemo vidjeti ova četiri niza i neke njihove karakteristike.

Tablica 1. Radioaktivni raspadni nizovi

| Ime niza | Vrsta | Konačna stabilna jezgra | Najdulje živići član | |
|------------|----------|----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| | | | Jezgra | Vrijeme poluraspada / god |
| Torijev | $4n$ | ^{208}Pb | ^{232}Th | $1,41 \cdot 10^{10}$ |
| Neptunijev | $4n + 1$ | ^{209}Bi | ^{237}Np | $2,14 \cdot 10^6$ |
| Uranijev | $4n + 2$ | ^{206}Pb | ^{238}U | $4,47 \cdot 10^9$ |
| Aktinijev | $4n + 3$ | ^{207}Pb | ^{235}U | $7,04 \cdot 10^8$ |

3. Radon

Radon je 1900. godine otkrio Friedrich Ernst Dorn u Njemačkoj. To je bio peti otkriveni radioaktivni element, nakon uranija, polonija, radija i torija. Ime je dobio po radiju jer nastaje pri njegovom α raspadu, iako je prvotno nazvan *niton* po latinskoj riječi *nitens* što znači sjajan.

3.1. Fizikalno – kemijske karakteristike radona

Radon je kemijski element atomskog broja 86 i simbola Rn. Radioaktivan je, jako radiotoksičan i kancerogen ako se udiše. Pri normalnim uvjetima plin je bez boje, okusa i mirisa, oko 8 puta gušći od zraka pri sobnoj temperaturi. Pripada u skupinu plemenitih plinova i najteži je poznati plin. Vrelište mu se nalazi na -71°C , a talište na -62°C . U čvrstom stanju fosforescira žutom svjetlošću koja daljnjim hlađenjem prelazi u narančastocrvenu. Zbog stabilne elektronske konfiguracije vrlo je inertan, ali pri određenim uvjetima može stvarati spojeve s fluorom.

Svi izotopi radona su radioaktivni i nastaju kao proizvodi raspadnih nizova uranija, aktinija i torija. Postoji preko trideset različitih izotopa radona. Najznačajniji izotop je ^{222}Rn (radon) i nastaje α raspadom izotopa radija 226 i pripada uranijevom raspadnom nizu. U radonskim istraživanjima se pod nazivom radon misli upravo na ovaj izotop, a njime se bavimo i u ovom radu. Vrijeme poluraspada ^{222}Rn je $t_{1/2} = 3,825$ dana, a prosječno vrijeme života mu je $\tau = 5,51$ dana. Ovaj izotop ima četiri kratkoživuća potomka: ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi i ^{214}Po , od kojih se oba polonija raspadaju α raspadom, a bizmut i olovo β i γ (Tablica 1.).

Drugi značajan izotop radona je ^{220}Rn (toron), s vremenom poluraspada $t_{1/2} = 55,6$ s i prosječnim vremenom života od $\tau = 80,2$ s. Ovaj izotop nastaje u raspadnom nizu torija po kojemu i nosi ime. Slično kao i ^{222}Rn , ima četiri kratkoživuća potomka: ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi i ^{212}Po . Zbog relativno kratkog vremena poluraspada, toron prevladuje puno kraće udaljenosti nego radon te je njegov utjecaj manje zanimljiv jer predstavlja iznimno lokalni doprinos ukupnoj radioaktivnosti.

Treći izotop je ^{219}Rn (aktinon), s vremenom poluraspada $t_{1/2} = 3,9$ s i prosječnim vremenom života od $\tau = 5,7$ s. Ime dobiva po aktinijevom raspadnom nizu (Tablica 1.), ali zbog kratkog vremena poluraspada te relativno male zastupljenosti u odnosu na ostale izotope nije predmet istraživanja.

U Tablici 2. možemo vidjeti ova tri izotopa i njihove potomke kao i pripadajuća vremena poluraspada i energije koje se pri tom raspadu oslobađaju.

Tablica 2. Fizikalne karakteristike radona, kao i njegovih kratkoživućih potomaka (vremena poluraspada, tipovi radioaktivnih raspada i odgovarajuće energije emitiranih čestica pri radioaktivnom raspadu)

| RADIONUKLID | VRIJEME POLURASPADA | VRSTE ZRAČENJA I ENERGIJE (MeV) | | |
|-------------------|------------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------|
| | | α | β | γ |
| RADON | | | | |
| ²²² Rn | 3,825 d | 5,4897 | | |
| ²¹⁸ Po | 3,05 min | 6,0026 | | |
| ²¹⁴ Pb | 26,8 min | | 0,67; 0,73 | 0,2952; 0,3520 |
| ²¹⁴ Bi | 19,7 min | | 1,51; 1,54; 3,17; 3,27 | |
| ²¹⁴ Po | 163,7 μs | 7,6869 | | |
| ²¹⁰ Pb | 22,3 god | | 0,017; 0,061 | |
| ²¹⁰ Bi | 5,013 d | | 1,161 | |
| ²¹⁰ Po | 138,38 d | 5,3044 | | |
| TORON | | | | |
| ²²⁰ Rn | 55,6 s | 6,2883 | | |
| ²¹⁶ Po | 150 ms | 6,7785 | | |
| ²¹² Pb | 10,64 h | | 0,331; 0,569 | 0,2386; 0,3001 |
| ²¹² Bi | 60,6 min | 6,0510; 6,0901 | 2,251 | 0,7271 |
| ²¹² Po | 0,298 μs | 8,7844 | | |
| ²⁰⁸ Tl | 3,053 min | | 1,796; 1,280; 1,520 | 0,5106; 0,5831; 2,6146 |
| AKTINON | | | | |
| ²¹⁹ Rn | 3,96 s | 6,4250; 6,5531; 6,8193 | | 0,2711; 0,4017 |
| ²¹⁵ Po | 1,78 ms | 7,3136 | | |
| ²¹¹ Pb | 36,1 min | | 1,38 | 0,4049; 0,4270; 0,8319 |
| ²¹¹ Bi | 2,14 min | 6,279; 6,623 | | |
| ²⁰⁷ Tl | 4,77 min | | 1,43 | 0,8972 |

Alfa - radioaktivni potomci predstavljaju veliku opasnost za opće zdravlje populacije, jer su potencijalni uzročnici karcinoma pluća. Naime, udisanjem zraka ulaze u trahiobronhijalni trakt, talože se, te prilikom radioaktivnog raspada oštećuju radiosenzitivno tkivo plućnog epitela.

3.2. Izvori radona

Glavni izvor radona (^{222}Rn) je tlo koje sadrži radij (^{226}Ra) koji α -raspadom daje plinoviti radon. Izotopi radona nastaju u mineralima, radioaktivnim raspadom odgovarajućih izotopa radija, koji su i sami produkti u nizovima ^{238}U (uranija), ^{235}U (aktinija) i ^{232}Th (torija). Prisutnost radona u tlu i stijenama ovisit će o količini i raspodjeli uranija u njima. Uranij u kamenitoj podlozi nalazimo kao sastav samih minerala poput kofinita $[\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}]$ i uraninita (U_3O_8) ili apsorbiranog u kristalne rešetke minerala poput cirkona (ZrSiO_4), apatita ($\text{Ca}_5(\text{F,Cl})(\text{PO}_4)_3$) i alanita $[\text{H}(\text{Ca,Fe})(\text{Al,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{13}]$. Ova zrnca otpuštaju uranij putem erozije. Mekana zrnca minerala u dodiru s vodom stvaraju čestice gline dok se čvršća zrnca (cirkon, monazit ili tinatit) povezuju u pješčane dijelove, što za posljedicu ima raznoliku razdiobu uranija u različitim vrstama tla, što utječe i na razdiobu potomaka u uranijevom nizu od kojih je radon jedan od članova [Radolić, 2000].

Tablica 3. Tipične koncentracije ^{222}Rn na različitim mjestima na Zemlji

| Lokacija | Koncentracija (atom cm^{-3}) |
|---------------------------------------|--|
| Zrak iznad oceana | 0,04 |
| Zrak neposredno iznad površine Zemlje | 4 |
| Tipična kuća | 20 |
| Plin u Zemlji | 20 000 |
| Unutrašnjost tipičnog minerala | 500 000 |

U tablici 3. su prikazane tipične koncentracije radona na različitim lokacijama, a iz navedenih se rezultata može zaključiti da većina radona nikad ne napušta mineral u kojem nastaje, već ostaje čvrsto zarobljen unutar kristalne rešetke do svog radioaktivnog raspada. No, manji dio ipak napušta kristalnu rešetku te vođen različitim transportnim mehanizmima prevaljuje put iz unutrašnjosti prema površini Zemlje.

Za kvantitativno opisivanje onih karakteristika tla koje utječu na iznos emanacije radona iz kristalne rešetke u pukotine u tlu značajna su dva parametra: sadržaj radija u tlu i koeficijent emanacije.

Sadržaj radija je obično zadan kao specifična aktivnost (Bq kg^{-1}). Tako izražen sadržaj radija ekvivalentan je iznosu ukupne „proizvodnje“ radona u tlu gdje 1 Bq kg^{-1} radija daje $1 \text{ atom kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ radona. Sadržaj radija u tlu prati sadržaj radija u stijenama od kojih je tlo nastalo.

Koeficijent emanacije se definira kao omjer radona generiranog u kristalnoj rešetci koji napušta zrnca minerala i ukupno nastalog radona u mineralu. Eksperimentalna mjerenja koeficijenta emanacije za različite vrste tla i zdrobljene stijene daju raspon vrijednosti od 0,05 do 0,7, a prikazane su u tablici 4.

Tablica 4. Vrijednost koeficijenta emanacije za različite vrste tla i smrvljenih stijena

| Vrsta tla | Koeficijent emanacije, e (%) |
|--|------------------------------|
| Šljunak | 15 – 40 |
| Pijesak | 15 – 30 |
| Glina | 30 – 70 |
| Smrvljene stijene (veličina čestica 1-8 mm) | 5 – 15 |
| Smrvljeni, uranom bogati granit (veličina čestica 1-8 mm) | 15 - 30 |

Radon unutar zatvorenih prostorija potječe uglavnom od tla ispod kuće, građevinskih materijala od kojih je izgrađena kuća - posebno pojedine vrste betona, prirodnog plina ili izvora vode kućanstva - radon se otapa u vodi, iz koje se u domaćinstvima oslobađa prilikom tuširanja i pranja. Ukoliko prostorija sadrži visoke koncentracije radona, najveći izvor radona u većini slučajeva biti će upravo tlo ispod kuće. Ovdje je od velike važnosti vrsta tla ispod građevine: ukoliko se radi o tlu visoke propusnosti, poput pjeskovitog tla, radon se lako može kretati i time uzrokovati visoku koncentraciju radona unutar zatvorenih prostorija.

Prilikom istraživanja radona često se uvodi geogeni radonski potencijal na temelju procjene permeabilnosti tla i koncentracije radona u tlu - za vrijednosti ispod 30 kBq/m^3 označava se kao niski, od 30 do 100 kBq/m^3 kao srednji, a za vrijednosti preko 100 kBq/m^3 visoki geogeni radonski potencijal [Kemski, 2001].

3.3. Koncentracije radona u kućama

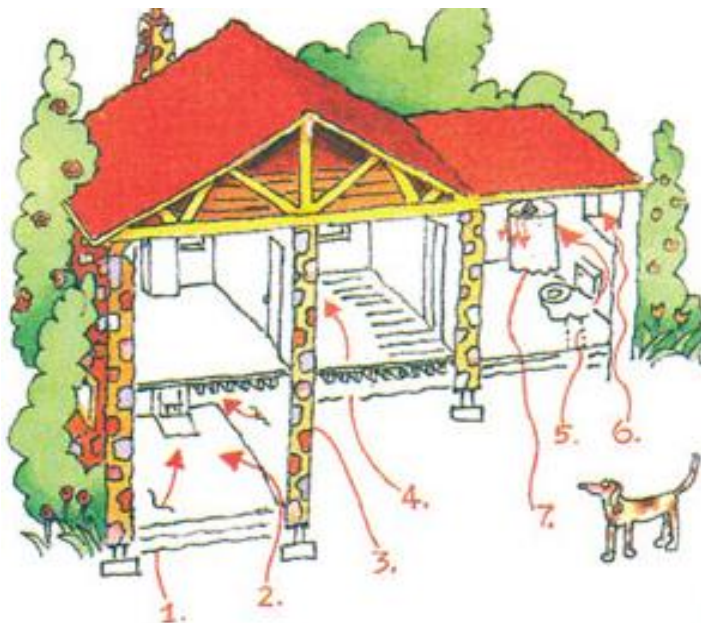
Prosječna koncentracija aktivnosti radona u kućama u svijetu je oko 50 Bq/m^3 , a na otvorenom prostoru ona iznosi oko 15 Bq/m^3 . Komisija Europske Unije je odlukom 90/143/Euratom iz 1990 preporučila da srednje godišnje koncentracije radona u zraku u kućama ne bi trebali premašiti vrijednosti: 400 Bq/m^3 za starogradnju i 200 Bq/m^3 za novogradnju. Iznad tih vrijednosti opravdano je započeti poduzimanje protumjera za redukciju razine radona vodeći računa i o ekonomskim odnosno društvenim faktorima. Na radnim mjestima se preporučuje poduzimanje intervencijskih mjera za redukciju razine radona ako srednja godišnja koncentracija u zraku premašuje iznos od 1000 Bq/m^3 . Direktiva EU iz 2013. godine (2013/59/Euratom) dalje naglašava potrebu praćenja koncentracije radona u kućama i radnim mjestima te preporuča nacionalnim regulatornim tijelima u zemljama EU da propisane referentne vrijednosti ne bi smjele premašiti iznos od 300 Bq/m^3 kako za kuće tako i za radna mjesta.

Intervencijske mjere za redukciju razine radona su pasivne i aktivne. Pasivne su: ugradnja zaštitne nepropusne membrane, temeljito brtvljenje podzemnog dijela kuće, što uključuje pažljivo zatvaranje svih pukotina i ugradnjom nepropusnih manšeta na sve prodore cijevi i instalacija kroz zid. Aktivne metode su: ugradnja dodatne ventilacije i ventilatora koji stvara podtlak u prostorijama s povećanom koncentracijom radona.

U Hrvatskoj srednja vrijednost radonske koncentracije u zraku u kućama iznosi 68 Bq/m^3 (minimum 4 Bq/m^3 , a maksimum 751 Bq/m^3) [Planinić i sur., 2006]. Stoga je očekivanje kako će radonske aktivnosti koncentracije u zraku u kućama Međimurske županije biti unutar prethodno navedenih vrijednosti za Hrvatsku.

3.4. Načini ulaska radona u kuću

Radon može prodrijeti u kuće iz raznih izvora i na razne načine (Slika 5). Koncentraciji radona u kućama najviše pridonosi tlo iz kojeg radon može izaći kroz veće ili manje otvore u temeljima kuća. Budući da radon konstantno izlazi iz tla, uvijek je prisutan u zraku, ali u određenim okolnostima koncentracija u prostoriji može biti značajno veća nego od normalne koncentracije u zraku. Većina zgrada i prostorija ima ograničen prostor s ograničenim kretnjama zraka i sporom izmjenom sa vanjskim zrakom. Kad radon jednom uđe u prostoriju dolazi do njegovog raspada i povećanja koncentracije produkata tog raspada. Razlika u tlaku glavni je način prelaska radona iz tla u prostoriju, budući da je tlak unutar prostorije obično niži nego u tlu. Koncentracija radona u pravilu će biti najveća u podrumu i u prizemlju. Koncentracija na prvom katu najčešće će biti upola manja, dok je koncentracija radona iznad prvog kata obično zanemariva. Koncentracija radona unutar zgrade obično je oko 5 puta veća nego na otvorenom. Mogući putovi ulaska radona u unutrašnjost kuće su kroz pukotine u podu, nosive betonske grede, pukotine na zidu, pukotine na podu zatvorene terase, vodovodnom i kanalizacijskom infrastrukturuom.



Slika 5. Načini ulaska radona u kuću (1. kroz pukotine na podu; 2. kroz poprečne grede; 3. kroz pukotine na zidu; 4. kroz pukotine na podu zatvorenog balkona; 5. kroz pukotine oko odvodnih cijevi; 6. kroz udubljenja u zidu; 7. vodovodnom i kanalizacijskom infrastrukturuom).

Tlo ispod kuće se nakon gradnje obično malo slegne i ostane prazan prostor između betonske ploče i površine zemlje. U tom se prostoru skuplja radon. Da bi spriječili njegovo prodiranje u građevinu, prije svega treba zatvoriti putove ulaska u kuću. Ukoliko je kuća kvalitetno napravljena i nema ni najmanjih pukotina na ploči i zidovima, te ako ploča kontinuirano prelazi u bočne zidove pri čemu je napravljena kvalitetna hidroizolacija, radon ne može prodrijeti u kuću.

Ako je kuća sagrađena na tlu iz kojeg se radon širi u većim količinama, najbolje je zadržati ga izvan stambenog prostora. Sanacija podruma u kojem se pojavljuje veća koncentracija radona je najdjelotvornija ako se sustavom ventilacijskih cijevi, radon izvuče ispod temeljne ploče i preusmjeri u okolni prostor. Za takvo jednostavno postrojenje dovoljan je i osrednji ventilator koji će u cijevima stvoriti podtlak dovoljan za njegovo kontinuirano odvođenje. Otvor u betonskoj ploči temelja znači opasnost od prodiranja podzemne vode pa takva izvedba zahtjeva stručnu primjenu najboljih izolacijskih materijala i brtvila. Suvremeni sustav prozračivanja niskoenergetskih objekata pokazali su se vrlo djelotvorni i u suzbijanju pojave radona u zraku stambenog prostora. Na sustav za prozračivanje s izmjenjivačem topline priključe se dodatni ogranci kojima se u podrumu temeljito izmjenjuje zrak. Zimi zagrijani zrak iz stambenog prostora i (topliji) zrak iz podruma u izmjenjivaču predaju svoju toplinu svježem zraku, a pregrijani svježi zrak stalno struji u kući.

3.5. Opasnost radona za zdravlje

Dobro je poznato da radon i njegovi kratkoživi potomci daju najveći doprinos zračenja koje čovjek primi iz prirodnih izvora i to preko 50%. Povećane koncentracije radona u prostorijama u kojima ljudi svakodnevno borave može iznimno negativno djelovati po zdravlje čovjeka u vidu povećavanja rizika od nastanka različitih karcinoma. Radon je moguće unijeti u tijelo na dva načina: udisanjem i kroz probavni sustav.

Radon se nakuplja u zatvorenim prostorijama, poput kuća ili podruma u koje ulazi difundiranjem izravno iz tla ili u prostoriju ulazi izravno iz zidova (zbog tragova uranija u 17 građevinskih materijala). Udisanjem zraka neizbježno udišemo i radon koji se u plućima raspada i zbog velike energije oslobođene pri raspadu oštećuje stanice plućnog tkiva. Zbog relativno dugog vremena poluživota radona, vjerojatnost da se raspadne u plućima je mala, no kod dovoljno velikih koncentracija radona doprinos izravnog raspada radona nije zanemariv. Puno veći doprinos imaju

radonovi neposredni potomci u raspadnom nizu, ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi i ^{214}Po koji se nakon raspada radona unutar prostorije vežu za sitne čestice u zraku (aerosole) te zatim udisanjem dospijevaju u pluća, ondje se talože i radioaktivno raspadaju. Količina zračenja koju primimo od radona i njegovih potomaka također ovisi i o veličini i koncentraciji aerosola u prostorima u kojima boravimo. Srednji dijelovi bronhijalnih grana deset puta su osjetljiviji od ostalih dijelova dišnog sustava, pa zbog radioaktivnog zračenja dolazi do anomalija u staničnim procesima i povećanja rizika od karcinoma. Dobra ventilacija i provjetravanje prostorija u kojima borave ljudi smanjuje koncentracije radona i njegovih potomaka u zraku.

Ako se radon iz slavine ne stigne osloboditi u zrak prilikom konzumacije vode, ona ide izravno u želudac iz kojega se radon može slobodno kretati tj. difundirati. U tijelu se radon i njegovi potomci radioaktivno raspadaju i oštećuju stanice.

Godišnja primljena efektivna doza uslijed ingestije radona u vodi računa se pomoću konverzijskog faktora koji iznosi $0,35 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq i uz pretpostavku da dojenčad, djeca i odrasli popiju redom 100, 75 odnosno 50 l vode godišnje.

Prema ICRP-u (1977.), uz primljenu efektivnu dozu od 1 Sv veže se vjerojatnost nastanka smrtonosne maligne bolesti kod ozračenog pojedinca od $1,65 \times 10^{-2}$. Kako većinom plućno tkivo primi značajnu dozu zračenja od radona i njegovih potomaka, rizik od $1,65 \times 10^{-2}$ odnosi se na vjerojatnost nastanka raka pluća. Za pojednca koji je tijekom života izložen zračenju radona i njegovih potomaka od 1 mSv / godišnje, rizik od smrti uslijed raka pluća povećava se za 0,1%. Uzevši u obzir prosječne vrijednosti koncentracije radona unutar zatvorenih prostorija u europskim i sjeverno američkim zemljama od 20 do 60 Bq/m³, boravak u takvim uvjetima će otprilike povećati rizik raka pluća za pojedince od 0,1 do 0,5%. Ovaj rizik nam govori da je povišena koncentracija radona uzrok pojavljivanja raka pluća kod čovjeka u 2 do 10% slučajeva [James, 1988].

4. Dozimetrija

4.1. Dozimetrijske veličine i mjerne jedinice

Apsorbirana doza (oznaka D) je fizikalna veličina koja se definira kao omjer srednje energije $d\bar{\epsilon}$ predane ionizirajućim zračenjem u elementu volumena V i mase dm tvari u tom volumenu:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (15)$$

Ona govori koliku energiju ionizirajuće zračenje prenese materijalu ili tvari na kojeg djeluje po jedinici mase.

SI mjerna jedinica za apsorbiranu dozu je $J\ kg^{-1}$ i naziva se **grej (Gy)**. Prije uvođenja SI jedinica, jedinica za apsorbiranu dozu bila je RAD (Radiation Absorbed Dose), a njihov međuodnos je:

$$1\ Gy = 100\ RAD$$

Težinska doza zračenja (Ekvivalentna doza), (oznaka H_T) je suma svih srednjih apsorbiranih doza koje potječu od zračenja R u organu ili tkivu T pomnožena s težinskim faktorima zračenja w_R :

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (16)$$

SI mjerna jedinica za ekvivalentnu dozu je $J\ kg^{-1}$, ali ima poseban naziv: **sivert (Sv)**. Starija jedinica je rem (roentgen equivalent man) ako je D izražen u radima. Težinski faktor w_R računa se iz energije koju određena vrsta zračenja prenese po jedinici dužine.

Vrijednosti težinskih faktora zračenja su uglavnom dobivene iz eksperimentalnih vrijednosti relativne biološke efektivnosti (RBE), koja je omjer doze određenog zračenja i doze X-zračenja koje uzrokuje iste biološke učinke, za različite vrste zračenja i prikazane su u tablici 5.

Tablica 5. Težinski faktori zračenja, w_R , prema ICRP 1991.

| Vrsta i energije zračenja | Težinski faktori zračenja, w_R |
|------------------------------------|----------------------------------|
| Fotoni, svih energija | 1 |
| Elektroni i muoni, svih energija | 1 |
| Protoni | 5 |
| α čestice | 20 |
| Neutroni, energije < 10 keV | 5 |
| Neutroni, energije 10 - 100 keV | 10 |
| Neutroni, energije 100 keV - 2 MeV | 20 |
| Neutroni, energije 2 MeV - 20 MeV | 10 |
| Neutroni, energije > 20 MeV | 5 |

Težinska doza zračenja ne uzima u obzir na koje tkivo utječe zračenje. Različita tkiva ili organi različito reagiraju na zračenje te to uvažavamo uvođenjem težinskih faktora tkiva koji odražavaju relativni rizik od nastanka karcinoma ili različitih bolesti.

Efektivna doza, (oznaka E) je suma težinskih doza zračenja H_T u svim organima i tkivima T pomnožena s težinskim faktorima tkiva w_T :

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot w_R \cdot D_{T,R} \quad (17)$$

SI mjerna jedinica za efektivnu dozu je **sivert (Sv)**.

Evolucija vrijednosti težinskih faktora za pojedine organe i tkiva ljudskog tijela prikazana je u Tablici 6. iz koje je vidljivo kako se s rastom spoznaja o biološkim efektima zračenja mijenjala i vrijednost težinskih faktora za pojedine organe odnosno tkiva (gonade, grudi i sl.).

Tablica 6. Težinski faktori tkiva w_T , prema publikacijama ICRP, 1977, 1991 i 2006.

| Tkivo ili organ | Težinski faktori tkiva w_T | | |
|-----------------------------|------------------------------|-------------|-------------|
| | ICRP, 1977. | ICRP, 1991. | ICRP, 2006. |
| Gonade | 0,25 | 0,20 | 0,08 |
| Koštana srž (crvena) | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| Debelo crijevo | | 0,12 | 0,12 |
| Pluća | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| Želudac | | 0,12 | 0,12 |
| Mjehur | | 0,05 | 0,05 |
| Grudi | 0,15 | 0,05 | 0,08 |
| Jetra | | 0,05 | 0,05 |
| Jednjak | | 0,05 | ,05 |
| Štitna žlijezda | 0,03 | 0,05 | 0,05 |
| Koža | | 0,01 | 0,01 |
| Površina kosti | 0,03 | 0,01 | 0,01 |
| Ostatak | 0,30 | 0,05 | 0,12 |
| UKUPNO: | 1,00 | 1,00 | 1,00 |

Tijekom cijelog života, čovjek je izložen prirodnoj radioaktivnosti. Prosječna efektivna doza po stanovniku Zemlje je 2,4 mSv godišnje, no raspon vrijednosti individualnih doza je velik. Tako se za oko 65% populacije očekuje raspon vrijednosti od 1 do 3 mSv, oko 25% populacije primit će dozu manju od 1 mSv, a samo oko 10% populacije primit će dozu preko 3 mSv [UNSCEAR 2000].

4.2. Dozimetrijski model za radon

Zbog različitih fizikalno-kemijskih svojstava radona i njegovih potomaka, njihov doprinos ukupnoj dozi zračenja mora se razmatrati odvojeno. Radon kao plemeniti plin i kemijski neaktivan unosi se u organizam udisanjem, ali zbog svog relativno dugog vremena poluživota, izdisanjem se na isti način gotovo u cijelosti i ukoni iz pluća. Njegovi kratkoživi potomci su metali te se vežu na čestice aerosola udisanjem bivaju uneseni u dišne organe i pluća gdje se onda talože. Raspadom oni emitiraju ionizirajuće zračenje koje oštećuje radiosenzitivno tkivo (prvenstveno se to odnosi na ^{218}Po koji emitira alfa zračenje).

Za procjenu doze radonovih potomaka od inhalacije važan parametar je raspodjela aktivnosti aerosola po promjeru. Naime, taloženje slobodnih potomaka i radonovih potomaka uhvaćenih na aerosole u plućima, prvenstveno ovisi o veličini aerosola.

Distribucija ^{218}Po ima dva moda: za promjer čestica od 1,2 nm i 100 nm. Čestice promjera $d=1,2$ nm su slobodni potomci koji se nisu uhvatili na čestice aerosola i one se uglavnom talože u trahiobronhijalnom dijelu respiratornog sustava (dušnik zajedno s ograncima koji se u području prsne šupljine dijele na lijevi i desni bronh, a ovi ulaze u odgovarajuća plućna krila). Veće čestice, promjera oko 100 nm se zadržavaju u nosnoj šupljini i uglavnom ne dolaze u pluća. Dakle, slobodni radionuklidi ^{218}Po imaju važnu ulogu u razvoju dozimetrijskih modela i pouzdanoj procjeni doznog ekvivalenta.

Doza zračenja koju tkivo primi zbog inhalacije radona i njegovih kratkoživućih potomaka teško se može mjeriti nego se uglavnom izračuna iz dozimetrijskih modela. Različiti modeli daju velike razlike u dozi.

Međunarodna komisija za radiološku zaštitu, ICRP (International Commission on Radiological Protection), preporučila je način računanja efektivnog doznog ekvivalenta prema jednadžbi [ICRP, 1987.]:

$$H_E = \varepsilon_1 c_{eq,u} + \varepsilon_2 c_{eq,v} + \varepsilon_3 c_{eq,d} \quad (18)$$

gdje su $c_{eq,u}$, $c_{eq,v}$ i $c_{eq,d}$ pripadne godišnje vrijednosti ekvivalentne ravnotežne koncentracije radona kod kuće, vani i drugdje (radno mjesto, škola i dr.); dok su vrijednosti odgovarajućih doznih

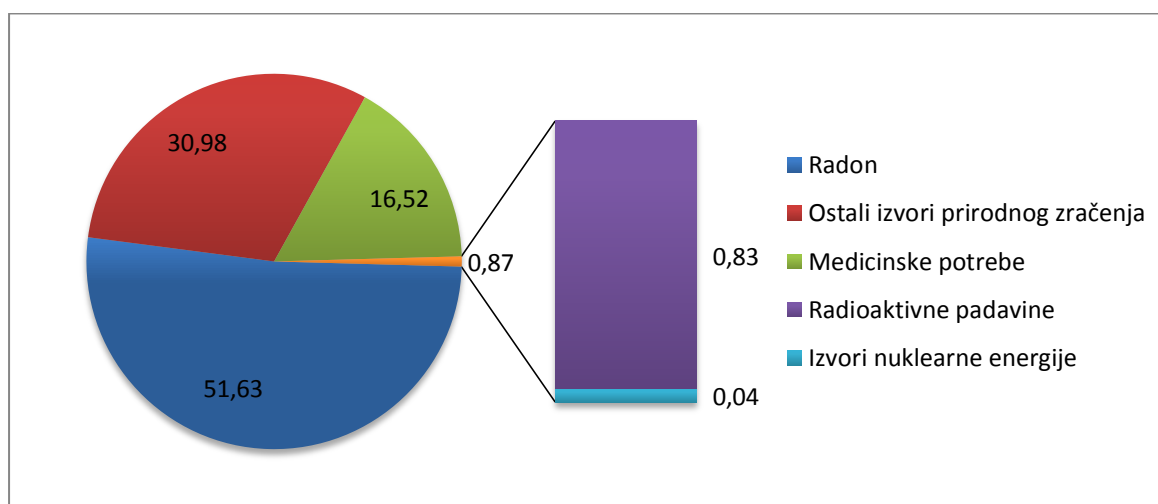
pretvorbenih faktora $\varepsilon_1 = 0,061 \text{ mSv (Bq m}^{-3}\text{)}^{-1}$, $\varepsilon_2 = 0,014 \text{ mSv (Bq m}^{-3}\text{)}^{-1}$ i $\varepsilon_3 = 0,016 \text{ mSv (Bq m}^{-3}\text{)}^{-1}$. Prema gornjoj jednadžbi i uz pretpostavku da su vrijednosti srednjih koncentracija aktivnosti radona unutra, $c_{0,u} = 42 \text{ Bq m}^{-3}$ i vani $c_{0,v} = 10 \text{ Bq m}^{-3}$ te vrijednosti srednjeg ravnotežnog faktora unutra, $F_u = 0,3$ i vani $F_v = 0,8$ dobiva se srednji efektivni dozni ekvivalent koji potječe od inhalacije radona i njegovih potomaka od $H_E = 1,15 \text{ mSv/god}$.

Procjena efektivnog doznog ekvivalenta od radona u kućama i njegovih kratkoživućih potomaka se može izračunati i pomoću slijedeće jednadžbe [UNSCEAR, 1993]:

$$H_E = (k_1 + k_2 F) \cdot c \cdot t \quad (19)$$

gdje su k_1 i k_2 faktori konverzije: $k_1 = 0,17 \text{ nSv (Bq m}^{-3}\text{)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ i $k_2 = 9,0 \text{ nSv (Bq m}^{-3}\text{)}^{-1} \text{ h}^{-1}$, F ravnotežni faktor, c koncentracija radona u kući, a t vrijeme provedeno u kući (broj sati na godinu).

Usporedba s ostalim izvorima prirodnog i umjetnog zračenja pokazuje da oko 50% efektivnog doznog ekvivalenta opće populacije potječe od inhalacije radona i njegovih potomaka (Slika 6.) [National Academy of Sciences, BEIR V, 1990.].



Slika 6. Prirodni, medicinski i tehnološki izvori zračenja i njihov udio u prosječnom godišnjem doznom ekvivalentu

5. Eksperimentalni dio

5.1. Međimurska županija

Međimurje je smješteno na dodiru dviju velikih reljefnih cjelina; Istočnih Alpi i Panonske nizine, na temelju čega su definirane dvije morfološke cjeline; brežuljkasto gorje (s najvišim vrhom Mohokosom 344,5 metara nadmorske visine) i nizinsko donje Međimurje. Zelenilo njene brežuljkaste i ravničarske unutrašnjosti presijecaju plavetnila stotinu manjih jezera i vodenih tokova te dva velika umjetna jezera HE Čakovec i Dubrava. Smješteno na sjeverozapadu Hrvatske, prometno najpovezanijem dijelu s Europom, omeđeno je prirodnim granicama-rijekom Murom na sjeveru i istoku i rijekom Dravom na jugu. Međimurje je smješteno u području umjereno tople, vlažne klime s dobro izraženim godišnjim dobima relativno vrućih ljeta, hladnih zima, brzim porastom temperatura u proljeće i povoljnim temperaturnim prilika u jesen.



Slika 7. Grb Međimurske županije

Na površini od 730 km², u najgušće naseljenoj županiji Republike Hrvatske, 113 804 stanovnika, živi u 3 grada (Čakovec, Prelog i Mursko Središće) i 22 općine.

5.2. Mjerenje koncentracije radona u kućama u Međimurskoj županiji

Za mjerenje radona u Međimurskoj županiji izabrana je metoda mjerenja pomoću detektora nuklearnih tragova. Ovom metodom se zračenje radona mjeri tako što se na određene lokacije

postave detektori koji na svojim filmovima registriraju tragove koji nastaju raspadom radona u blizini detektora. Pomoću broja tih tragova na filmovima se izračunava koncentracija radona.

5.3. Izrada detektora

U izradi detektorske kutijice koristimo dva film detektora LR-115 S tip II. To je odvojivi "Strippable (S)", nitrocelulozni ($C_{20}H_{16}N_4$) film, gdje oznaka tip II znači deklariranu debljinu od 12 μm , proizvođača Kodak-Pathe iz Francuske. Korištena su dva filma jer se tom metodom može odrediti koncentracija radona ali i ravnotežni faktor između radona i njegovih potomaka.

Filmovi su pakirani u kutiji i namotani u dugačku traku duljine 13 m i širine 9 cm. Detektor za mjerenje koji ćemo koristiti treba biti dimenzija $3 \times 3 \text{ cm}^2$, stoga traku treba izrezati. Filmovi se izrezuju skalpelom pomoću kartonskog predloška. Tolerancija rezanja je $\pm 1 \text{ mm}$, jer nije potrebna veća preciznost.



Slika 8. Izrada filmova

Kod rezanja filmova treba razlikovati aktivnu i neaktivnu stranu. Film je napravljen tako da se preko jedne strane celuloidne baze stavlja aktivni sloj celuloidnog nitrata obojen u crveno. Na neaktivnoj strani je celuloid, a na aktivnoj strani je crveni sloj, a film je i malo svinut na tu stranu.

Prilikom rezanja gledamo da je aktivna strana prema gore. Filmove pri rukovanju treba što manje doticati prstima, a najbolje je raditi u mekim pamučnim rukavicama.

Na izrezane filmove se urezuje oznaka koja sadrži dva broja. Prvi broj je broj županije, i po dogovoru on se piše rimskim brojevima (za Međimursku županiju to je „XX“), a drugi broj je redni broj detektora (npr. XX-15).



Slika 9. Detektor – plastična posudica s filmovima

Za svaki detektor su nam potrebna dva filma, jedan se lijepi na vanjski bočni rub plastične posude tzv. vanjski film i drugi koji se lijepi na unutarnji dio poklopca posude tzv. difuzni film. Ova dva filma imaju isti redni broj, ali kako bi ih kasnije razlikovali, difuznom filmu dodaje se još oznaka „/“, npr. detektor ima vanjski film XX-15 i difuzni XX-15/.

Filmovi se nakon označavanja umataju u aluminijsku traku (staniol) kako bi zaštitili detektore od mehaničkih oštećenja i zračenja. Aluminijska traka je obična alu-folija za domaćinstvo dimenzija 14x6cm. Ona se izrezuje iz velike role trganjem preko ruba stola ili ravnala. Debljina trake nije važna.



Slika 10. Čuvanje filmova u aluminijskoj foliji

Difuzni film pričvrstimo na poklopac s unutarnje strane pomoću ljepljive trake i to na način da trakom zahvatimo što manju površinu filma. Kad je difuzni film zalijepljen, pričvrstimo poklopac za plastičnu posudu i istim načinom na vanjski rub posude zalijepimo vanjski film. Na poklopac s vanjske strane se zalijepi naljepnica na kojoj piše broj detektora. Kad je sve napravljeno detektor je spreman za postavljanje.

5.4. Postavljanje i prikupljanje detektora

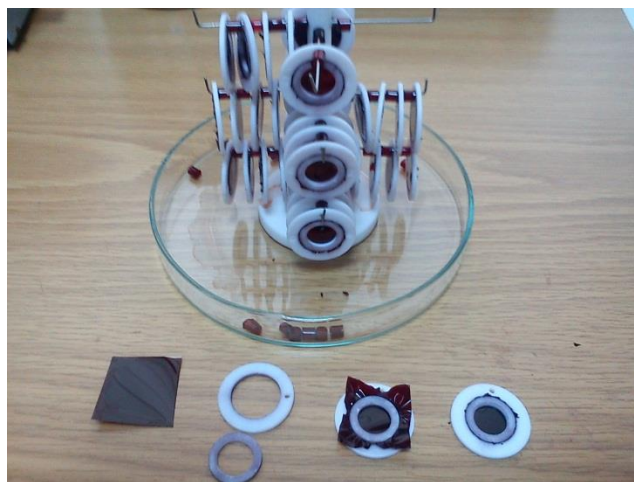
Postavljanje detektora je izvršeno u razdoblju od 18. lipnja do 1. srpnja 2010. godine. Detektori (slika 9) se postavljaju u prostoriju u kojoj se najviše boravi, obično je to spavaća ili dnevna soba, na povišeno mjesto (npr. na 2/3 visine prostorije, npr. na ormar), tako da detektor stoji na poklopcu, a da mrežica bude okrenuta prema gore dok vanjski film gleda prema sredini prostorije. Prilikom postavljanja detektora važno je upisati u tablicu točan datum kad je detektor postavljen (start), a vlasniku kuće ili stana je važno naglasiti da što manje pomiče i dodiruje detektor kako ga ne bi uništio. Prilikom donošenja detektora vlasniku kuće, zapisala sam sljedeće podatke: ime i prezime, adresa, mjesto, broj članova obitelji, te broj članova mlađih od 12 godina, redni br. kata, start i stop (nakon izlaganja).

Nakon godinu dana, u razdoblju od 16. do 26. lipnja 2011. godine prikupljeni su izloženi detektori. Kod prikupljanja detektora važno je odmah, čim se detektor ukloni sa svoje lokacije, skinuti filmove i umotati ih u aluminijsku foliju kako filmovi više ne bi bilježili tragove i zapisati u tablicu točan datum i vrijeme (stop). Filmove umotane u aluminijsku foliju odlažemo u hladnjak, gdje su pohranjeni do jetkanja.

5.5. Jetkanje filmova

Jetkanje filmova je postupak proširivanja tragova kako bi se tragovi na filmu lakše uočili a time i prebrojali. Jetkanje je izvršeno u razdoblju od 28. lipnja do 5. srpnja 2011. godine. Jetkanje filmova je osnovna metoda kemijske obrade detektora nuklearnih tragova.

Filmovi se jedan po jedan vade iz aluminijske folije, broj filma se upisuje u *knjigu jetkanja*. Uzima se vanjski prsten za jetkanje odvojivih filmova i upiše se njegov broj tako da se broju filma pridoda broj vanjskog prstena u knjizi jetkanja. Film se tada pažljivo odvoji s celuloidne baze i stavlja na vanjski prsten. Film je tanak i delikatno se treba postupati s njim. Uzima se unutarnji prsten i utisne u vanjski prsten tako da film ostane učvršćen između ta dva prstena. Višak filma se pažljivo odreže skalpelom, kako se ne bi izvukao iz prstena ili pokidao. Vanjski prsten ima na vrhu rupu pa se tako mogu vješati na stalak jetkanja.



Slika 11. Izgled prstenja (nosača) za filmove *LR-115 S tip II* i stavljanje filmova na stalak

Na stalak jetkanja između filmova se stavlja plastični separator kako filmovi ne bi bili priljubljeni jedan uz drugi i tako se loše kemijski obradili. Vanjsko i unutarnje prstenje treba biti čisto (oprano i suho) prije upotrebe. To se radi tako da se u petrijevoj zdjelici pod mlazom vode operu pa potom posuše na ubrusu. Uz izložene filmove se stavlja i tzv. nulti film koji je bio cijelo vrijeme u hladnjaku, a služi za određivanje pozadinskog zračenja od radona tj. "background" koncentracije. Filmovi se stavljaju 20 minuta u destiliranu vodu kako bi se oprali. Potom su spremni za postupak jetkanja. Nakon pranja, stalak s filmovima uronili smo u 10% otopinu NaOH koja se nalazi u termostatskoj posudi za jetkanje na temperaturi 50 °C. Tijekom jetkanja otopina se ne smije miješati.



Slika 12. Priprema 10% otopine NaOH



Slika 13. Jetkanje filmova

Sam postupak jetkanja trajao je 2,5 sata (150 minuta). Nakon toga smo stalak sa filmovima vratili ponovno u destiliranu vodu kako bi se filmovi oprali od NaOH. Pranje filmova ponovno traje 20 minuta, a nakon pranja se suše na zraku u sobi 24 sata. Nakon sušenja, detektori su spremni za brojanje.

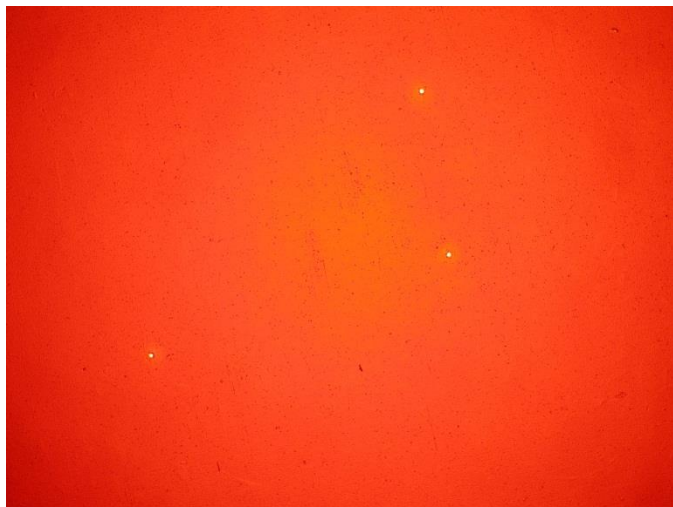
5.6. Brojanje tragova i statistička obrada

Brojanje je postupak brojanja tragova na određenoj površini filma. Trag je oštećenje filma uzrokovano α -česticama (rupa u detektoru) koja je procesom jetkanja proširena. Nakon kemijske obrade i sušenja filmova, tragovi na filmu LR-115 S, tip II automatski se broje pomoću uređaja Spark Counter AIST-2V (proizvođač V.G. Khlopin Radium Institute, Rusija).

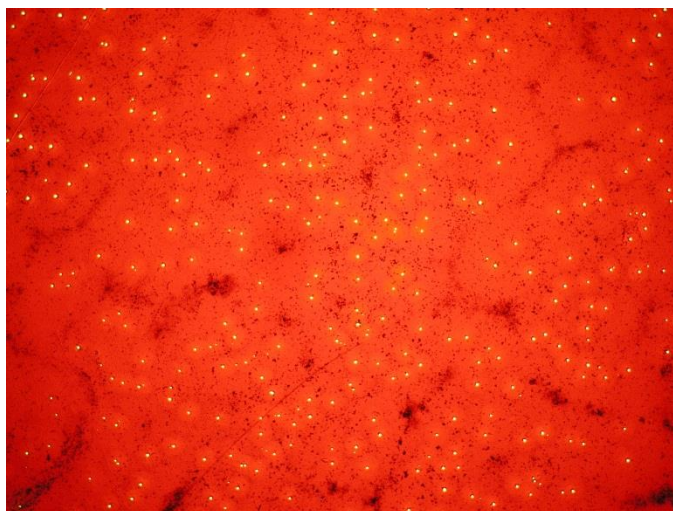


Slika 14. Uređaj Spark Counter AIST-2V

Broj tragova se upisuje u *knjigu brojanja*, ali je potrebno iz *knjige jetkanja* vidjeti o kojem se filmu radi jer je na vanjskom prstenu broj prstena, a ne broj izlaganog filma.



Slika 15. Mala gustoća tragova



Slika 16. Velika gustoća tragova

Prilikom obrade rezultata pretpostavlja se da tragovi razasuti na filmu detektora slijede Poissonovu raspodjelu (kao i kod ostalih nuklearnih događaja u kojima sudjeluje mnoštvo čestica od kojih samo neke ostavljaju tragove). Prema toj razdiobi, standardna devijacija se određuje kao korijen od ukupnog broja tragova, N pa je vidljivo da ih već nekoliko stotina daje prihvatljivu statističku pogrešku. Tako npr. za 400 prebrojanih tragova, standardna devijacija iznosi 20 tragova, a relativna pogreška (standardna devijacija / srednja vrijednost) iznosi 5% [Durrani, 1997].

5.6.1. Matematički izrazi za računanje

Gustoća tragova ρ je broj tragova na filmu po cm^2 , a računa se izrazom:

$$\rho = \frac{\sum t_i}{N \cdot P} \quad (\text{trag}/\text{cm}^2) \quad (20)$$

Izračun **pogreške brojanja tragova** σ_ρ (Poissonova statistika \rightarrow pogreška se računa kao drugi korijen izbrojanih tragova):

$$\sigma_\rho = \frac{\sqrt{\frac{\sum t_i}{N}}}{P} \quad (\text{trag}/\text{cm}^2) \quad (21)$$

gdje su: $\sum t_i$ – zbroj svih tragova na jednom filmu, N – broj polja (4), P – površina brojanog područja filma koje za film LR 115 S u prstenu iznosi $1,06 \text{ cm}^2$.

Izračun **gustoće tragova nultog filma** ρ_0 :

$$\rho_0 = \frac{\sum t_{0i}}{N \cdot P} \quad (\text{trag}/\text{cm}^2) \quad (22)$$

Izračun **pogreške brojanja tragova nultog filma** $\sigma_{\rho 0}$:

$$\sigma_{\rho 0} = \frac{\sqrt{\frac{\sum t_{0i}}{N}}}{P} \quad (\text{trag}/\text{cm}^2) \quad (23)$$

gdje su: $\sum t_{0i}$ – zbroj svih tragova na nultom filmu, N – broj polja (4), P – površina brojanog područja filma ($1,06 \text{ cm}^2$).

Početak mjerenja i završetak mjerenja trebaju biti u formatu: dd:mm:yyyy hh:mm:ss, a Δt – je broj dana koji su protekli od početka do kraja mjerenja.

Izračun razlike između gustoće tragova filma i nultog filma n :

$$n = \rho - \rho_0 \quad (24)$$

Izračun gustoće tragova u vremenu vanjskog filma D :

$$D = \frac{n}{\Delta t} \quad (25)$$

Izračun gustoće tragova u vremenu difuznog filma D' :

$$D' = \frac{n}{\Delta t} \quad (26)$$

Izračun koncentracije aktivnosti radona ili češće samo **koncentracije radona c^{Rn}** :

$$c^{Rn} = D' \cdot k \quad (Bq/m^3) \quad (27)$$

gdje je: k – koeficijent osjetljivosti koji za ovu tehniku iznosi $k = 65 \pm 23 \text{ Bq m}^{-3}/\text{trag cm}^{-2} \text{ dan}^{-1}$

Izračun **pogreške mjerenja koncentracije radona σ_{cRn}** :

$$\sigma_{cRn} = \sqrt{(D' \cdot 23)^2 + \left(\frac{65}{\Delta t} \cdot \sigma_\rho\right)^2 + \left(\frac{65}{\Delta t} \cdot \sigma_{\rho_0}\right)^2} \quad (Bq/m^3) \quad (28)$$

Metoda mjerenja s dva detektora nuklearnih tragova (difuzijskim i vanjskim) omogućava određivanje **ravnotežnog faktora F** , između radona i njegovih potomaka u zraku kao i bolju procjenu radonske doze. Ravnotežni faktor se određuje prema izrazu:

$$F = a \frac{D}{D'} + b \quad (29)$$

uz vrijednosti parametara: $a = 0,50$ i $b = -0,53$ [Planinić i sur., 1997].

Procjena **efektivne doze** (H) od radona i njegovih potomaka u kućama izvršena je pomoću izraza:

$$H = (k_1 + k_2 \cdot F) \cdot c \cdot T \quad (30)$$

gdje su faktori konverzije $k_1=0,17 \text{ nSv (Bq/m}^3\text{)}^{-1} \text{ h}^{-1}$ i $k_2=9,0 \text{ nSv (Bq/m}^3\text{)}^{-1} \text{ h}^{-1}$, F - ravnotežni faktor, c - koncentracija radona, a $T = 0,6 \cdot 365,25 \cdot 24 \text{ h} = 5260 \text{ h}$ – vrijeme boravka pojedinca u kući, tj. vrijeme izlaganja radonu.

Izračun **pogreške ravnotežnog faktora** σ_F :

$$\sigma_F = \sqrt{\left(\frac{0,5}{(\rho' - \rho_0)} \cdot \sigma_\rho\right)^2 + \left(\frac{-0,5 \cdot (\rho - \rho_0)}{(\rho' - \rho_0)^2} \cdot \sigma_{\rho'}\right)^2 + \left(\frac{-0,5 \cdot (\rho - \rho')}{(\rho' - \rho_0)^2} \cdot \sigma_{\rho_0}\right)^2} \quad (31)$$

gdje je oznaka “'”, za difuzni film.

6. Rezultati i rasprava

Tablica 7. Rezultati mjerenja radona, provedenog 2004. godine, u kućama u Međimurskoj županiji; t predstavlja vrijeme izlaganja detektora (u danima), c je koncentracija radona u kući, σ_c je pripadna standardna devijacija (izračunata prema jednadžbi (28)), a F je ravnotežni faktor između radona i njegovih kratkoživućih potomaka, σ_F je pogreška ravnotežnog faktora.

| Detektor | Mjesto | t / d | $c / Bq m^{-3}$ | $\sigma_c / Bq m^{-3}$ | F | $\sigma_F / Bq m^{-3}$ |
|----------|--------------------|---------|-----------------|------------------------|------|------------------------|
| XX-001 | Brezje | | 26 | 2 | | |
| XX-002 | Savska Ves | | 221 | 11 | 0,43 | 0,025 |
| XX-003 | Čehovec | | 126 | 7 | | |
| XX-004 | Mala Subotica | | 39 | 3 | | |
| XX-005 | Mursko Središće | | 128 | 7 | 0,81 | 0,050 |
| XX-006 | Šenkovec | | 24 | 2 | | |
| XX-007 | Čakovec | | 54 | 4 | 0,88 | 0,078 |
| XX-008 | Mursko Središće | | 118 | 7 | 0,47 | 0,041 |
| XX-009 | Podbrest | | 126 | 7 | 0,77 | 0,049 |
| XX-010 | Novo Selo Rok | | 57 | 4 | | |
| XX-011 | Prelog | | 16 | 2 | 0,69 | 0,136 |
| XX-012 | Držimurec | | 41 | 3 | 0,41 | 0,063 |
| XX-013 | Podbrest | | 207 | 11 | 0,48 | 0,030 |
| XX-016 | Čakovec | | 15 | 2 | | |
| XX-017 | Novo Selo na Dravi | | 73 | 5 | | |
| XX-018 | Podturen | | 60 | 4 | | |
| XX-019 | Selnica | | 30 | 3 | 0,77 | 0,106 |
| XX-020 | Mali Mihaljevec | | 52 | 3 | | |
| XX-022 | Kotoriba | | 85 | 5 | | |
| XX-023 | Sveti Urban | | 54 | 4 | 0,52 | 0,060 |
| XX-024 | Mursko Središće | | 38 | 3 | 0,79 | 0,086 |
| XX-026 | Donji Kraljevec | | 83 | 5 | 0,76 | 0,062 |
| XX-027 | Nedelišće | | 58 | 4 | 0,80 | 0,066 |

U Tablici 8. su prikazani rezultati izvršenih mjerenja radona u kućama u Međimurskoj županiji.

Tablica 8. Rezultati mjerenja radona u kućama u Međimurskoj županiji; t predstavlja vrijeme izlaganja detektora (u danima), c je koncentracija radona u kući, σ_c je pripadna standardna devijacija (izračunata prema jednadžbi (28)), a F je ravnotežni faktor između radona i njegovih kratkoživućih potomaka, σ_F je pogreška ravnotežnog faktora. Tablica ne započinje s detektorom XX - 1 jer su ta mjerenja izvršena ranije, tablica 7., a mjerenja izvršena za vrijeme nastajanja diplomskog rada su započela s XX – 14.

| Detektor | Mjesto | t / d | $c / Bq m^{-3}$ | $\sigma_c / Bq m^{-3}$ | F | $\sigma_F / Bq m^{-3}$ |
|----------|--------------|---------|-----------------|------------------------|-------|------------------------|
| XX - 14 | Šenkovec | 354 | 63 | 23 | 0,775 | 0,082 |
| XX - 15 | Čakovec | 365 | 42 | 15 | 0,845 | 0,105 |
| XX - 25 | Savska Ves | 366 | 74 | 26 | 0,822 | 0,271 |
| XX - 28 | Ivanovec | 359 | 114 | 41 | | |
| XX - 29 | Savska Ves | 359 | 172 | 61 | 0,343 | 0,035 |
| XX - 30 | Strahoninec | 362 | 72 | 26 | 0,489 | 0,062 |
| XX - 31 | Čakovec | 355 | 40 | 14 | | |
| XX - 32 | Štrukovec | 363 | 19 | 7 | | |
| XX - 33 | Čakovec | 358 | 39 | 14 | 0,714 | 0,101 |
| XX - 34 | Čakovec | 354 | 220 | 78 | | |
| XX - 35 | Pribislavec | 357 | 90 | 32 | 0,517 | 0,056 |
| XX - 38 | Bukovec | 356 | 100 | 36 | 0,473 | 0,052 |
| XX - 39 | Nedelišće | 357 | 121 | 43 | 0,404 | 0,044 |
| XX - 40 | Zebanec Selo | 358 | 36 | 13 | 0,645 | 0,1 |
| XX - 42 | Macinec | 367 | 117 | 42 | 0,251 | 0,038 |
| XX - 44 | Šenkovec | 355 | 48 | 17 | 0,626 | 0,085 |
| XX - 45 | Šenkovec | 355 | 131 | 47 | 0,582 | 0,049 |
| XX - 46 | Macinec | 359 | 58 | 21 | 0,56 | 0,073 |
| XX - 48 | Ivanovec | 350 | 50 | 18 | | |
| XX - 49 | Ivanovec | 358 | 35 | 13 | 0,465 | 0,089 |

Tablica 8. (nastavak)

| Detektor | Mjesto | t / d | c / Bq m⁻³ | σ_c / Bq m⁻³ | F | σ_F / Bq m⁻³ |
|-----------------|------------------|--------------|------------------------------|--|----------|--|
| XX - 50 | Gradišćak | 357 | 42 | 15 | 0,413 | 0,077 |
| XX - 51 | Okrugli Vrh | 360 | 28 | 10 | | |
| XX - 53 | Frkanovec | 355 | 111 | 39 | | |
| XX - 55 | Otok, Prelog | 363 | 36 | 13 | 0,13 | 0,062 |
| XX - 56 | Oporovec | 363 | 41 | 15 | 0,469 | 0,081 |
| XX - 57 | Gornji Hrašćan | 359 | 109 | 39 | 0,783 | 0,061 |
| XX - 58 | Mursko Središće | 361 | 114 | 41 | 0,78 | 0,061 |
| XX - 59 | Podturen | 363 | 49 | 17 | 0,355 | 0,066 |
| XX - 60 | Strahoninec | 359 | 58 | 21 | 0,504 | 0,069 |
| XX - 61 | Donji Pustakovec | 363 | 225 | 80 | 0,54 | 0,036 |
| XX - 62 | Strahoninec | 361 | 33 | 12 | | |
| XX - 63 | Nedelišće | 362 | 58 | 21 | | |
| XX - 65 | Lopatinec | 362 | 288 | 102 | 0,578 | 0,032 |
| XX - 66 | Čakovec | 361 | 23 | 8 | | |
| XX - 67 | Vukanovec | 363 | 24 | 9 | 0,468 | 0,106 |
| XX - 68 | Merhatovec | 356 | 77 | 27 | | |
| XX - 69 | Zasadbreg | 361 | 40 | 15 | 0,591 | 0,089 |
| XX - 70 | Čakovec | 361 | 77 | 27 | | |
| XX - 71 | Čakovec | 354 | 88 | 31 | 0,292 | 0,047 |
| XX - 72 | Čakovec | 359 | 53 | 19 | 0,212 | 0,055 |
| XX - 73 | Nedelišće | 362 | 113 | 40 | 0,252 | 0,039 |
| XX - 74 | Čakovec | 357 | 41 | 15 | 0,88 | 0,108 |
| XX - 75 | Čakovec | 354 | 61 | 22 | 0,57 | 0,071 |
| XX - 76 | Strahoninec | 361 | 109 | 39 | 0,427 | 0,047 |
| XX - 77 | Čakovec | 361 | 36 | 13 | | |
| XX - 78 | Strahoninec | 356 | 138 | 49 | 0,396 | 0,041 |
| XX - 79 | Plešivica | 355 | 24 | 9 | 0,879 | 0,143 |
| XX - 80 | Selnica | 358 | 50 | 18 | | |

Tablica 8. (nastavak)

| Detektor | Mjesto | t / d | c / Bq m⁻³ | σ_c / Bq m⁻³ | F | σ_F / Bq m⁻³ |
|-----------------|------------------|--------------|------------------------------|--|----------|--|
| XX - 81 | Mačkovec | 354 | 125 | 45 | | |
| XX - 82 | Podbrest | 363 | 41 | 15 | | |
| XX - 83 | Mursko Središće | 355 | 30 | 11 | 0,86 | 0,127 |
| XX - 84 | Banfi | 357 | 15 | 6 | 0,774 | 0,173 |
| XX - 85 | Čakovec | 361 | 186 | 66 | 0,709 | 0,045 |
| XX - 86 | Novo Selo Rok | 359 | 59 | 21 | | |
| XX - 87 | Jurovčak | 359 | 104 | 37 | 0,723 | 0,061 |
| XX - 88 | Palinovec | 359 | 64 | 23 | 0,874 | 0,086 |
| XX - 89 | Turčišće | 359 | 58 | 21 | 0,888 | 0,092 |
| XX - 90 | Vučetinec | 360 | 11 | 4 | | |
| XX - 91 | Trnovec | 368 | 41 | 15 | 0,23 | 0,064 |
| XX - 92 | Belica | 353 | 56 | 20 | 0,639 | 0,079 |
| XX - 93 | Belica | 353 | 60 | 22 | | |
| XX - 94 | Ivanovec | 358 | 68 | 24 | | |
| XX - 95 | Domašinec | 359 | 54 | 19 | | |
| XX - 96 | Sveti Križ | 363 | 25 | 9 | 0,737 | 0,128 |
| XX - 97 | Železna Gora | 357 | 56 | 20 | 0,292 | 0,059 |
| XX - 98 | Ferketinec | 360 | 61 | 22 | | |
| XX - 99 | Prelog | 363 | 38 | 14 | | |
| XX - 100 | Donji Pustakovec | 363 | 24 | 9 | | |
| XX - 101 | Otok, Prelog | 365 | 40 | 14 | | |
| XX - 102 | Hlapičina | 357 | 83 | 29 | | |
| XX - 103 | Gornji Kraljevec | 359 | 18 | 7 | | |
| XX - 104 | Totovec | 362 | 228 | 81 | 0,563 | 0,036 |
| XX - 105 | Kuršanec | 368 | 100 | 36 | 0,475 | 0,051 |
| XX - 106 | Novakovec | 360 | 24 | 9 | | |
| XX - 107 | Podturen | 360 | 46 | 17 | 0,813 | 0,095 |
| XX - 108 | Bogdanovec | 360 | 45 | 16 | | |

Tablica 8. (nastavak)

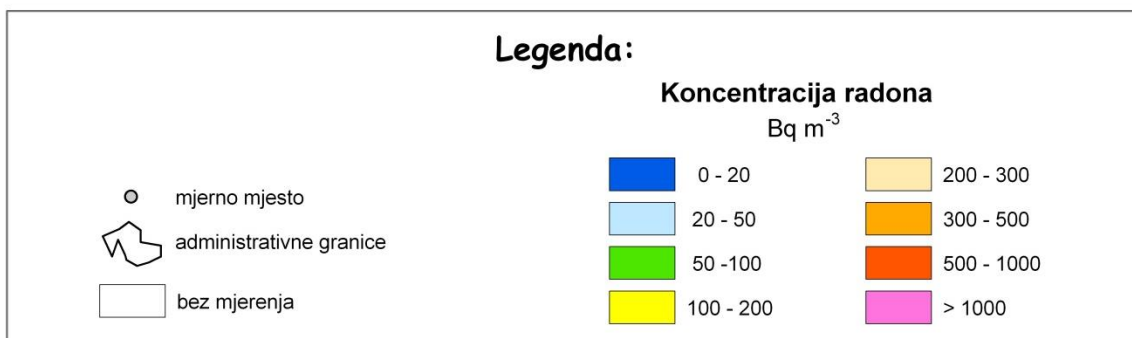
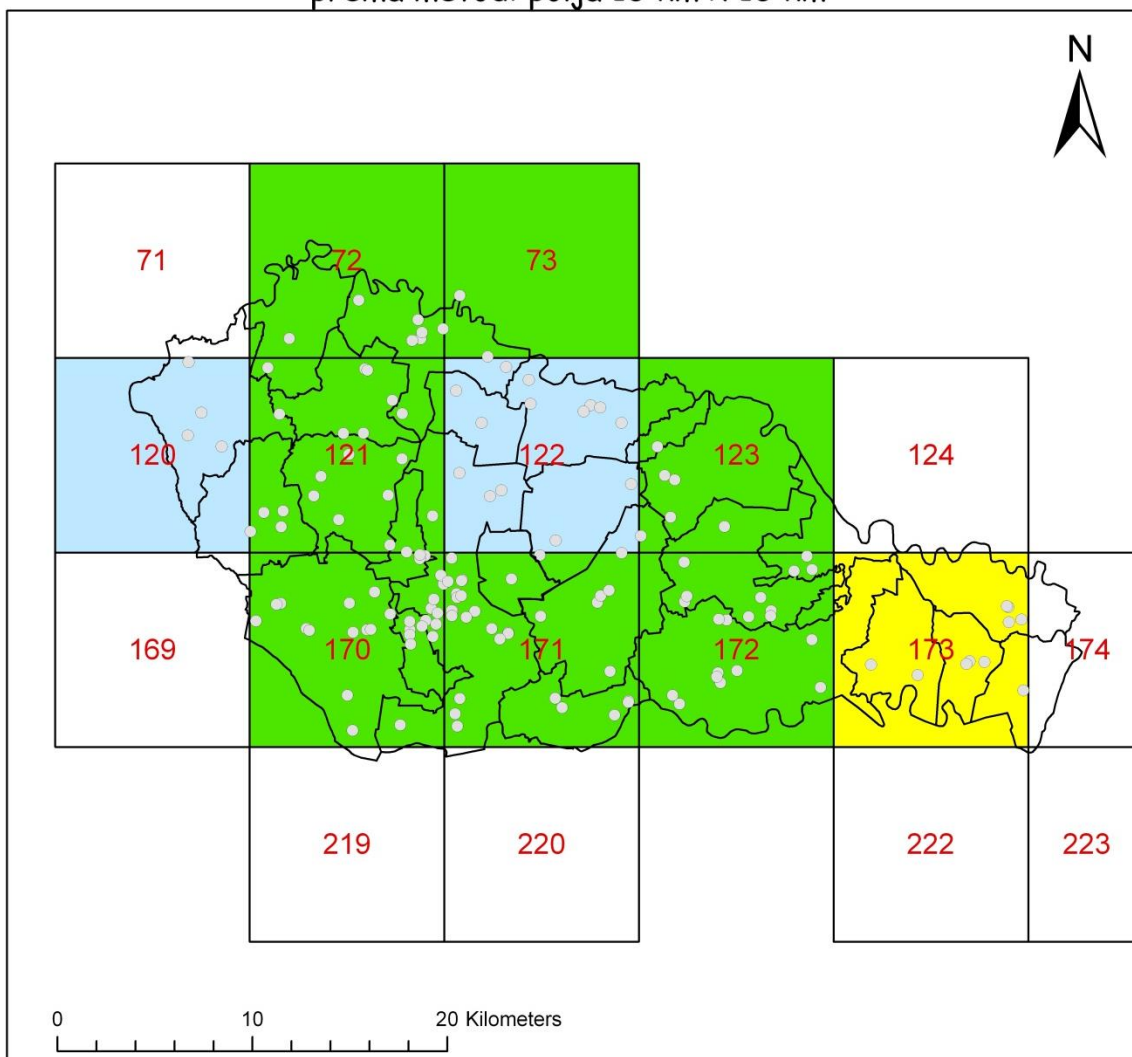
| Detektor | Mjesto | t / d | c / Bq m⁻³ | σ_c / Bq m⁻³ | F | σ_F / Bq m⁻³ |
|-----------------|--------------------|--------------|------------------------------|--|----------|--|
| XX - 109 | Dunjekovec | 359 | 67 | 24 | 0,609 | 0,069 |
| XX - 110 | Čakovec | 362 | 60 | 21 | | |
| XX - 111 | Mala Subotica | 364 | 52 | 19 | 0,582 | 0,076 |
| XX - 112 | Prelog | 360 | 48 | 17 | 0,294 | 0,063 |
| XX - 113 | Gornji Hrašćan | 367 | 57 | 20 | | |
| XX - 114 | Gardinovec | 353 | 49 | 18 | 0,542 | 0,078 |
| XX - 115 | Palovec | 359 | 108 | 39 | 0,793 | 0,062 |
| XX - 116 | Donji Hrašćan | 361 | 24 | 9 | | |
| XX - 117 | Miklavec | 359 | 26 | 10 | | |
| XX - 118 | Orehovica | 368 | 229 | 81 | 0,503 | 0,034 |
| XX - 119 | Prelog | 363 | 200 | 71 | 0,48 | 0,036 |
| XX - 120 | Sveta Marija | 360 | 142 | 50 | | |
| XX - 121 | Pušćine | 368 | 122 | 43 | 0,418 | 0,043 |
| XX - 123 | Držimurec | 364 | 37 | 13 | 0,21 | 0,065 |
| XX - 124 | Orehovica | 368 | 106 | 38 | 0,524 | 0,051 |
| XX - 125 | Vratišinec | 359 | 72 | 26 | 0,162 | 0,044 |
| XX - 126 | Gornji Kuršanec | 371 | 157 | 56 | | |
| XX - 127 | Novo Selo Na Dravi | 368 | 35 | 13 | 0,874 | 0,114 |
| XX - 128 | Goričan | 361 | 127 | 45 | 0,38 | 0,042 |
| XX - 130 | Mihovljan | 361 | 71 | 25 | | |
| XX - 131 | Dragoslavec Breg | 360 | 25 | 9 | 0,7 | 0,123 |
| XX - 132 | Dekanovec | 360 | 33 | 12 | 0,531 | 0,094 |
| XX - 133 | Sveti Urban | 361 | 32 | 12 | 0,527 | 0,094 |
| XX - 134 | Gornji Mihaljevec | 359 | 14 | 5 | | |
| XX - 135 | Domašinec | 363 | 207 | 74 | 0,152 | 0,026 |
| XX - 136 | Štefanec | 355 | 184 | 65 | 0,868 | 0,051 |
| XX - 137 | Sv. Martin na Muri | 368 | 111 | 40 | 0,711 | 0,058 |
| XX - 138 | Čakovec | 365 | 19 | 7 | | |

Tablica 8. (nastavak)

| Detektor | Mjesto | t / d | c / Bq m⁻³ | σ_c / Bq m⁻³ | F | σ_F / Bq m⁻³ |
|-----------------|------------------|--------------|------------------------------|--|----------|--|
| XX - 139 | Donji Mihaljevec | 378 | 65 | 23 | | |
| XX - 140 | Krištanovec | 359 | 36 | 13 | | |
| XX - 142 | Savska Ves | 362 | 26 | 10 | | |
| XX - 143 | Čehovec | 363 | 39 | 14 | | |
| XX - 144 | Draškovec | 363 | 58 | 21 | | |
| XX - 145 | Peklenica | 359 | 31 | 11 | | |
| XX - 146 | Križovec | 363 | 63 | 23 | | |
| XX - 147 | Donji Kraljevec | 361 | 63 | 23 | 0,373 | 0,061 |
| XX - 148 | Donja Dubrava | 362 | 57 | 20 | 0,688 | 0,083 |
| XX - 149 | Donji Kraljevec | 363 | 88 | 31 | 0,642 | 0,063 |
| XX - 150 | Donji Kraljevec | 363 | 97 | 35 | 0,359 | 0,048 |
| XX - 151 | Donji Vidovec | 360 | 528 | 187 | | |
| XX - 152 | Donji Vidovec | 360 | 126 | 45 | 0,427 | 0,044 |
| XX - 153 | Goričan | 361 | 120 | 43 | 0,716 | 0,057 |
| XX - 154 | Goričan | 361 | 33 | 12 | | |
| XX - 156 | Donji Vidovec | 360 | 76 | 27 | 0,834 | 0,078 |
| XX - 157 | Kotoriba | 362 | 140 | 50 | 0,228 | 0,035 |
| XX - 158 | Kotoriba | 362 | 89 | 32 | 0,608 | 0,061 |
| XX - 159 | Kotoriba | 362 | 48 | 17 | | |

Srednja vrijednost koncentracije radona uz pripadnu standardnu devijaciju u kućama Međimurske županije iznosi $79 \pm 66 \text{ Bq m}^{-3}$ dok je geometrijska sredina $61,0 \text{ Bq m}^{-3}$. Srednja vrijednost ravnotežnog faktora (F) je $0,55 \pm 0,21$.

**Zemljovid koncentracije radona
u kućama Međimurske županije
prema metodi polja 10 km x 10 km**



Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, srpanj 2014.

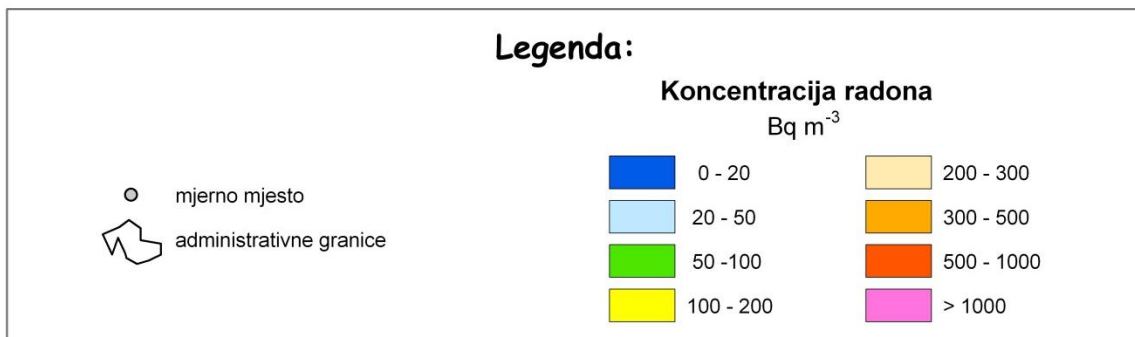
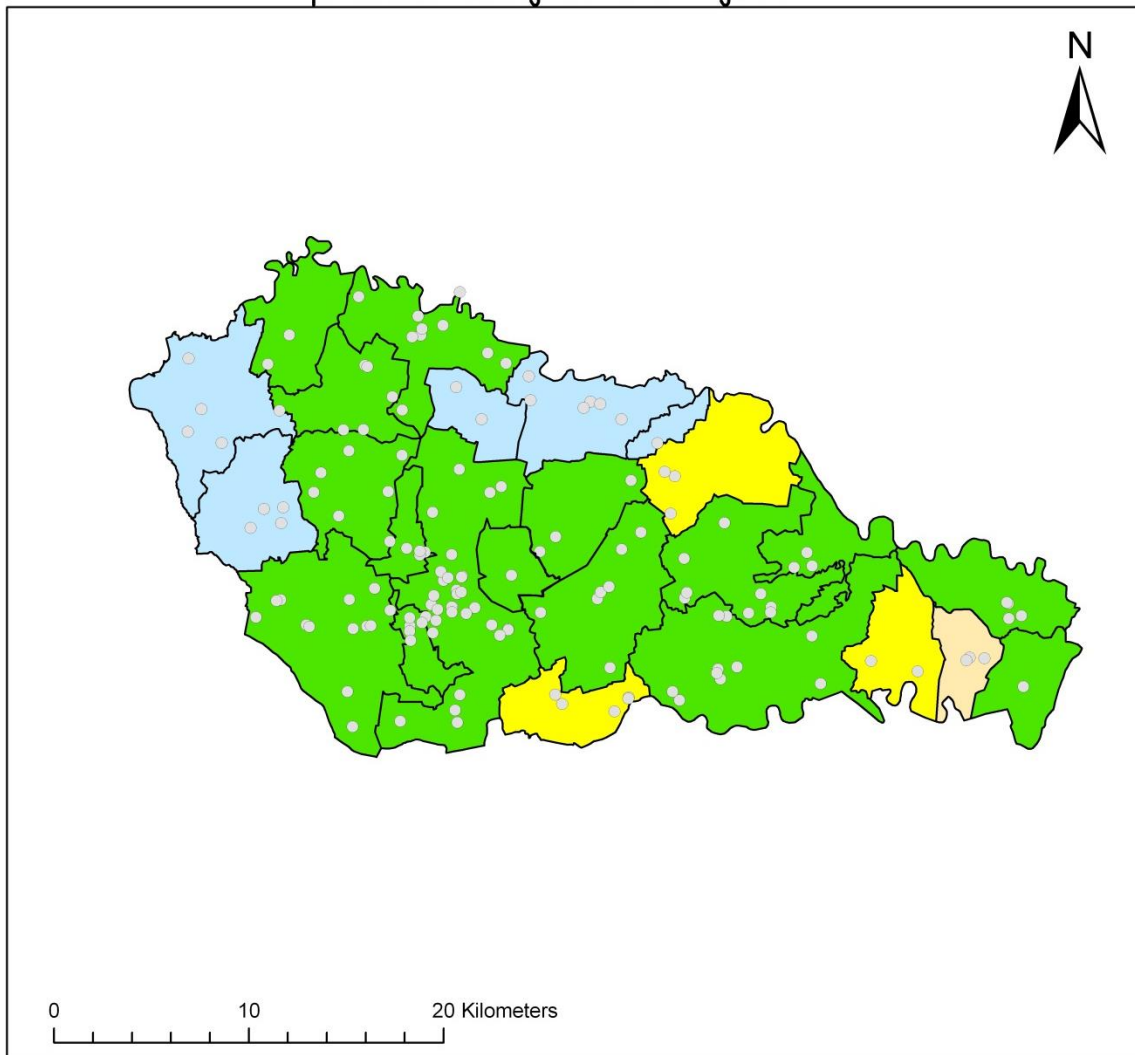
Slika 17. Zemljovid koncentracije radona u kućama Međimurske županije (podjela po kvadrantima)

Izmjerene koncentracije radona u zraku u naseljima iz Tablice 8. razvrstane su po gradovima i općinama u koje ta naselja pripadaju prema teritorijalnom ustroju RH. Za svaki grad i općinu u Međimurskoj županiji je potom izračunata aritmetička i geometrijska sredina radonskih koncentracija te odstupanje od aritmetičke sredine, a rezultati su prikazani u Tablici 9.

Tablica 9. Broj mjerenja u svakom gradu i općini, podatci o aritmetičkoj sredini, standardnoj devijaciji, geometrijskoj sredini te najmanjoj i najvećoj vrijednosti koncentracije radona za pojedinu općinu ili grad.

| Općina | Broj mjerenja | Aritmetička sredina | Standardna devijacija | Geometrijska sredina | Min - Max |
|----------------------|------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|-----------|
| Čakovec | 33 | 79 | 61 | 62 | 15 - 228 |
| Prelog | 10 | 64 | 56 | 50 | 16 - 200 |
| Mursko Središće | 9 | 69 | 42 | 57 | 19 - 128 |
| Belica | 3 | 55 | 6 | 55 | 49 - 60 |
| Dekanovec | 1 | 33 | 0 | 33 | 33 - 33 |
| Domašinec | 3 | 106 | 87 | 87 | 54 - 207 |
| Donja Dubrava | 1 | 57 | 0 | 57 | 57 - 57 |
| Donji Kraljevec | 8 | 84 | 64 | 66 | 24 - 225 |
| Donji Vidovec | 3 | 243 | 248 | 172 | 76 - 528 |
| Goričan | 3 | 93 | 52 | 80 | 33 - 127 |
| Gornji Mihaljevec | 4 | 27 | 13 | 25 | 14 - 45 |
| Kotoriba | 4 | 90 | 38 | 84 | 48 - 140 |
| Mala Subotica | 7 | 70 | 57 | 55 | 25 - 184 |
| Nedelišće | 12 | 90 | 37 | 83 | 41 - 157 |
| Orehovica | 5 | 142 | 77 | 121 | 41 - 229 |
| Podturen | 6 | 44 | 16 | 42 | 24 - 61 |
| Pribislavec | 1 | 90 | 0 | 90 | 90 - 90 |
| Selnica | 6 | 53 | 30 | 47 | 24 - 100 |
| Strahoninec | 5 | 82 | 37 | 73 | 33 - 138 |
| Sveta Marija | 2 | 104 | 54 | 96 | 65 - 142 |
| Sveti Juraj na Bregu | 7 | 79 | 97 | 48 | 11 - 288 |
| Sveti Martin na Muri | 3 | 86 | 38 | 79 | 42 - 111 |
| Šenkovec | 4 | 66 | 46 | 55 | 24 - 131 |
| Štrigova | 4 | 39 | 19 | 35 | 15 - 56 |
| Vratišinec | 2 | 45 | 38 | 36 | 18 - 72 |

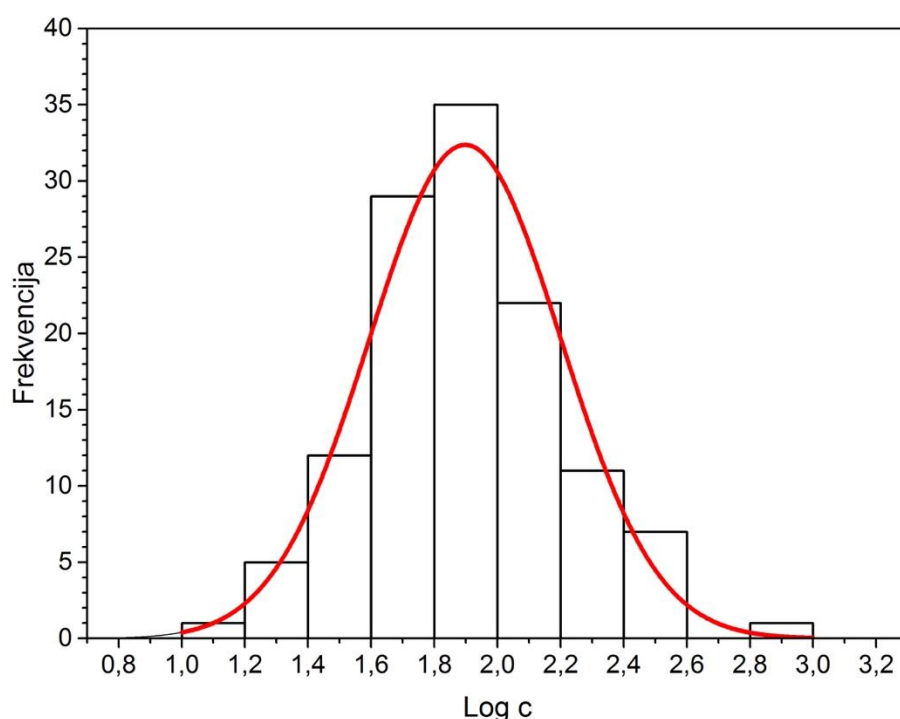
**Zemljovid koncentracije radona
u kućama Međimurske županije
prema teritorijalnom ustroju RH**



Odjel za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, srpanj 2014.

Slika 18. Zemljovid koncentracije u zraku u kućama na području Međimurske županije po općinama.

Raspodjela koncentracija radona u kućama uobičajeno slijedi lognormalnu distribuciju odnosno logaritmi koncentracija radona slijede Gaussovu distribuciju. Za sve izmjerene radonske koncentracije iz Tablice 7. i Tablice 8. izračuna se dekadski logaritam i zatim se izbroji koliko takvih kuća ima u određenom intervalu (interval širine 0,2 na logaritmaskoj skali). Histogram dobivenih empirijskih frekvencija je prikazan na Slici 19. Nacrtana je pripadna teorijska krivulja, a Kolmogorov-Smirnovim testom je provjereno postoji li statistička povezanost između empirijskih podataka i teorijske prilagodbe. Dobivena K-S vrijednost iznosi $0,069 < 0,606$ što je vjerojatnost teorijske K-S distribucije pri razini signifikantnosti od 95%. Time se može zaključiti da logaritmi koncentracije radona u kućama Međimurske županije slijede normalnu razdiobu odnosno koncentracije radona slijede lognormalnu razdiobu.



Slika 19. Histogram empirijskih frekvencija (broj kuća unutar razreda logaritama radonskih koncentracija širine 0,2) po logaritmima radonskih koncentracija. Crvena krivulja je odgovarajuća prilagođena krivulja normalne distribucije.

Procjena godišnjeg efektivnog doznog ekvivalenta za stanovnike Međimurske županije izvodi se pomoću jednadžbe (30), a uz pretpostavku da pojedinac 60% svog vremena provodi u kući ($T = 0,6 \cdot 365,25 \cdot 24 \text{ h} = 5260 \text{ h}$). Tada uz srednju vrijednost radonske koncentracije od 79 Bq m^{-3} i srednji ravnotežni faktor od 0,55, vrijednost srednjeg godišnjeg efektivnog doznog ekvivalenta koji potječe od radona i njegovih kratkoživućih potomaka za stanovnike Međimurske županije iznosi $H_E = 2,09 \text{ mSv}$.

7. Zaključak

Jednogodišnja mjerenja koncentracije radona u kućama Međimurske županije obuhvatila su sva 3 grada i 22 općine. Radonska koncentracija mjerena je metodom s dva detektora nuklearnih tragova LR-115 S tip II koja omogućava i procjenu ravnotežnog faktora.

Na području Međimurske županije utvrđena je srednja vrijednost koncentracije radona od 79 Bq m⁻³ sa standardnom devijacijom 66 Bq m⁻³, te s geometrijskom sredinom od 61,0 Bq m⁻³. Najniža koncentracija radona izmjerena je u Vučetincu i iznosila je 11 Bq m⁻³, dok je u mjestu Donji Vidovec izmjerena najviša koncentracija radona od 528 Bq m⁻³.

Srednji ravnotežni faktor između radona i njegovih kratkoživućih potomaka iznosi 0,55 , a srednji godišnji efektivni dozni ekvivalent koji stanovništvo Međimurske županije primi od radona i njegovih kratkoživućih potomaka iznosi $H_E = 2,09$ mSv.

Iako na temelju ovih podataka možemo zaključiti da je koncentracija radona u zraku u kućama Međimurske županije unutar društveno prihvatljivih vrijednosti (<300 Bq m⁻³) ipak su na nekim lokacijama izmjerene povišene vrijednosti. U tim kućama bi, u bližoj budućnosti, trebalo ponoviti mjerenja i ukoliko se potvrde povišene vrijednosti pokušati pristupiti aktivnostima usmjerenim ka redukciji koncentracije radona nekom od dostupnih i prihvatljivih metoda.

8. Literatura

Durrani, Saeed A.; Ilić, R., Radon Measurement by Etched Track detectors, Applications in Radiation, Singapore, 1997.

Faj, Z., Pregled povijesti fizike, Drugo dopunjeno izdanje, Sveučilište J.J.Strossmayera, Pedagoški fakultet, Osijek, 1999.

International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1987. Lung Cancer Risk from Indoor Exposures to Radon Daughters // In: ICRP Publication, vol. 50. , Annals of the ICRP 17 (1).

International Commission on Radiological Protection (ICRP), 1994. Protection against Radon-222 at home and at work. In: ICRP Publication, vol. 65. Pergamon Press, Oxford, pp. 1-262.

Jakobović, Z., Ionizirajuće zračenje i čovjek, Školska knjiga, Zagreb, 1991.

James, A., Lung Dosimetry // Nazaroff, W.; Nero, Jr., Radon and its decay products in indoor air: An Overview. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1988., Str. 259-304.

Kemski, J.; Siehl, A.; Stegemann, R.; Valdivia-Manchego M. Mapping the geogenic radon potential in Germany. // The Science of the Total Environment. **272**, 2001; 217-230.

NAS/NRC (National Academy of Sciences/National Research Council): Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation, BEIR V. Washington DC, National Academy Press, 1990

Planinić, J.; Radolić, V.; Faj Z.; Šuveljak, B. Radon equilibrium factor and aerosols // Nuclear Instruments & Methods in Physics Research A, 396 (1997), 414-417.

Radolić, V., Vuković, B., Stanić, D., Katić, M., Faj, Z., Šuveljak, B., Lukačević, I., Faj, D., Lukić, M., Planinić, J., National survey of indoor radon levels in Croatia // Jurnal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 269 (2006), 1; 87-90.

Radolić, V. Mjerenje radona i radonovih potomaka u zraku pri različitim koncentracijama aerosola / magistarski rad. Zagreb : Prirodoslovno-matematički fakultet, 03. 03. 2000., 100 str.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Sources and Effects of Ionising Radiation. Volume I: Sources. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly with scientific annexes. New York: United Nations, 2000.

United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), Source effects of ionising radiation, UNSCEAR Report 1993, New York.

9. Životopis

Rođena sam 17. travnja 1987. godine u Čakovcu. Osnovnu školu sam pohađala u Strahonincu, a prirodoslovno - matematičku gimnaziju završila sam u Gimnaziji Josipa Slavenskog Čakovec. Nakon završetka srednje škole upisujem akademske godine 2006./2007. preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku i završavam ga akademske godine 2008/2009. te dobivam titulu prvostupnice fizike. Akademske godine 2009/2010. upisujem diplomski studij fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku. 24.09.2012. zaposlila sam se u Osnovnoj školi Kuršanec u Kuršancu kao učiteljica fizike, kasnije dopunjavam satnicu u Osnovnoj školi dr. Ivana Novaka Macincec u Macincu. 05.11.2013. zapošljavam se u III. osnovnoj školi Varaždin i u IV. osnovnoj školi Varaždin kao učiteljica fizike. Trenutno živim u Savskoj Vesi sa suprugom, sinom i kćeri.